



Une approche mésoscopique pour l'enseignement de la statique des fluides. Étude des raisonnements des apprenants, élaboration et expérimentation d'une séquence d'enseignement.

Ugo Besson

► To cite this version:

Ugo Besson. Une approche mésoscopique pour l'enseignement de la statique des fluides. Étude des raisonnements des apprenants, élaboration et expérimentation d'une séquence d'enseignement.. Enseignement de la physique [physics.ed-ph]. Université Denis Diderot - Paris 7, 2001. Français. NNT: . tel-01273020

HAL Id: tel-01273020

<https://theses.hal.science/tel-01273020>

Submitted on 16 Feb 2016

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

UNIVERSITE PARIS 7 – "DENIS DIDEROT"

THÈSE de DOCTORAT

Spécialité : **Didactique des Disciplines**
Option : **Physique**

**UNE APPROCHE MÉSCOPIQUE POUR
L'ENSEIGNEMENT DE LA STATIQUE DES FLUIDES.
Etude des raisonnements des apprenants, élaboration et
expérimentation d'une séquence d'enseignement.**

par **Ugo Besson**

Soutenue le 19 décembre 2001 devant un jury composé de:

Lidia Borghi, Université de Pavie, Italie

François Gallet, Université Paris 7

Marisa Michelini, Université de Udine, Italie

Marie-Geneviève Séré, Université Paris-Sud XI

Laurence Viennot, Directeur de Thèse, Université Paris 7

Remerciements

Je tiens à remercier Laurence Viennot pour ses suggestions et contributions importantes, toujours gentiment données, et pour son inlassable encouragement à continuer dans cette entreprise. Je pense avec plaisir au long travail fait ensemble, dans un esprit de collaboration et dans une ambiance de bonne humeur.

Je remercie Jacques Lega pour sa collaboration importante et sa disponibilité, qui ont permis l'expérimentation de la séquence d'enseignement à l'Université de Louvain la Neuve, Belgique, où il travaille.

Mes remerciements vont aussi à Françoise Chauvet, qui a accepté avec gentillesse de proposer la séquence didactique à des groupes d'enseignants en formation, à l'IUFM de Lille.

Je suis reconnaissant aux collègues du Laboratoire de Didactique des Sciences Physiques (LDSP) de l'Université Paris 7, pour les suggestions et les observations données toujours amicalement et avec sympathie.

Je remercie Lidia Borghi, François Gallet, Marisa Michelini et Marie-Geneviève Séré pour le temps et l'attention qu'ils ont consacrés à la lecture de cette thèse et pour leur participation au jury.

Je veux adresser un grand remerciement à tous les enseignants, les étudiants et les élèves, belges, italiens et français, qui ont voulu coopérer à la réalisation de cette recherche.

TABLE DES MATIERES

page

| | |
|--|-----------|
| CHAPITRE 1. INTRODUCTION..... | 7 |
| CHAPITRE 2. L'ÉTAT DE LA QUESTION DANS LA RECHERCHE DIDACTIQUE..... | 12 |
| 2.1 Les conceptions des élèves | 12 |
| 2.1.1 Piaget et les stades du développement | 12 |
| 2.1.2 Conceptions concernant les gaz | 13 |
| 2.1.2 Conceptions concernant les liquides | 16 |
| 2.1.3 La poussée d'Archimède | 22 |
| 2.2 Les stratégies de changement conceptuel..... | 22 |
| 2.3 Les séquences d'enseignement sur les fluides | 26 |
| 2.4 Conclusions | 32 |
| CHAPITRE 3. QUELQUES IDÉES GUIDES | 35 |
| 3.1 La pression..... | 35 |
| 3.2 Poids action et poids quantité..... | 37 |
| 3.3 Cause efficiente et cause contingente..... | 38 |
| 3.4 Le niveau mésoscopique | 39 |
| 3.5 Temps et causalité, régimes permanents et transitoires | 41 |
| 3.6 Articulation entre différents raisonnements..... | 43 |
| 3.6.1 La loi de l'hydrostatique | 43 |
| 3.6.2 La poussée d'Archimède..... | 44 |
| 3.7 Le rôle des conceptions des apprenants | 44 |
| CHAPITRE 4. ETUDE DES RAISONNEMENTS : LES ENTRETIENS | 47 |
| 4.1 Objectifs | 47 |
| 4.2 Protocole d'entretien | 48 |
| 4.3 Méthodologie utilisée | 51 |

| | |
|--|------------|
| 4.4 Analyse de l'entretien avec L | 52 |
| 4.4.1 Les réponses de l'élève | 52 |
| 4.4.2 Les idées de l'élève..... | 53 |
| 4.4.3 La déstabilisation | 55 |
| 4.4.4 Synthèse | 56 |
| 4.5 Analyse de l'entretien avec D | 57 |
| 4.5.1 Les réponses et les idées de l'élève | 57 |
| 4.5.2 Synthèse | 58 |
| 4.6 Conclusions | 59 |
| ANNEXE 1. Texte de l'entretien avec L..... | 60 |
| ANNEXE 2. Texte de l'entretien avec D | 67 |
| CHAPITRE 5. ETUDE DES RAISONNEMENTS : LES | |
| QUESTIONNAIRES..... | 72 |
| 5.1 La définition des questionnaires | 72 |
| 5.2 La loi de l'hydrostatique : la formule et le mécanisme..... | 75 |
| 5.2.1 La pression dans une chambre et dans une grotte sous-marine | 75 |
| 5.2.2 Les forces entre l'eau et le rocher..... | 78 |
| 5.2.3 Quelques conclusions..... | 81 |
| 5.3 La force pressante et le poids | 82 |
| 5.3.1 La force au fond de trois récipients de forme différente..... | 83 |
| 5.3.2 Pression de l'air et force pressante de l'eau | 84 |
| 5.3.3 La pression en deux points au fond d'un récipient de forme irrégulière | 87 |
| 5.3.4 Poids quantité et poids action..... | 88 |
| 5.3.5 Quelques conclusions..... | 89 |
| 5.4 La force pressante est le poids : causalité et identité | 90 |
| 5.4.1 Le questionnaire "Interactions" | 90 |
| 5.4.2 Quelques conclusions..... | 91 |
| 5.5 La poussée d'Archimède : description globale et raisonnement local | 92 |
| 5.5.1 Les forces de pression sur un ballon dans l'eau..... | 92 |
| 5.5.2 La poussée d'Archimède et les forces de pression | 94 |
| 5.5.3 Les forces de pression sur un ballon dans l'air | 99 |
| 5.5.4 Quelques conclusions..... | 101 |
| 5.6 Variations internes et externes : les fluides sont-ils compressibles ?..... | 102 |
| 5.6.1 Les liquides sont-ils compressibles ? | 102 |
| 5.6.2 La compressibilité de l'air | 105 |
| 5.6.3 Quelques conclusions..... | 107 |
| 5.7 Le texte des questionnaires utilises..... | 108 |

| | |
|---|----------------|
| CHAPITRE 6. UNE SÉQUENCE D'ENSEIGNEMENT SUR LA STATIQUE DES FLUIDES | 114 |
| 6.1 Objectifs et caractéristiques de la séquence..... | 114 |
| 6.2 Dispositif expérimental | 117 |
| 6.3 Description de la séquence..... | 118 |
| 6.3.1 La mécanique des balles de mousse..... | 118 |
| 6.3.2 Analogie entre liquide et balles de mousse | 122 |
| 6.3.3 Débats finaux en petits groupes | 125 |
| 6.4 Le texte des questionnaires utilisés..... | 127 |
| CHAPITRE 7. EVALUATION DE LA SÉQUENCE: LES QUESTIONNAIRES..... | 131 |
| 7.1 Elaboration des questionnaires..... | 131 |
| 7.1.1 Le pre-test..... | 131 |
| 7.1.2 Le post-test..... | 132 |
| 7.2 Résultats du pre-test : Questionnaire "Récipients" | 135 |
| 7.2.1 Résultats bruts | 135 |
| 7.2.2 Analyse des résultats et des justifications | 137 |
| 7.3 Post-test : Questionnaire "Poissons" | 138 |
| 7.3.1 Résultats bruts | 138 |
| 7.3.2 Analyse des résultats et des justifications | 143 |
| 7.3.3 Quelques conclusions..... | 145 |
| 7.4 Post-test : Questionnaire "Ballon dans l'eau" | 145 |
| 7.4.1 Résultats bruts : question 1 | 146 |
| 7.4.2 Question 1 : analyse des résultats..... | 148 |
| 7.4.3 Résultats bruts : question 2 | 150 |
| 7.4.4 Question 2 : analyse des résultats..... | 151 |
| 7.5 Post-test : Questionnaire "Seringue" | 152 |
| 7.5.1 Résultats bruts | 152 |
| 7.5.2 Analyse des résultats et des justifications | 154 |
| 7.5.3 Quelques conclusions..... | 157 |
| 7.6 Post-test : Questionnaire "Casserole" | 157 |
| 7.7 Réactions et évaluations des enseignants sur une éventuelle utilisation de la séquence | 159 |
| 7.7.1 La présentation de la séquence à deux groupes d'enseignants | 159 |
| 7.7.2 Analyse des réponses des enseignants au questionnaire | 160 |
| 7.7.3 Quelques conclusions..... | 163 |
| 7.8 Conclusions | 164 |

| | |
|--|----------------|
| CHAPITRE 8. LES DEBATS DES ETUDIANTS | 167 |
| 8.1 Recueil des données..... | 167 |
| 8.2 Grille d'analyse des enregistrements | 168 |
| 8.3 Résultats de l'analyse des débats | 169 |
| 8.3.1 Engagement dans le débat..... | 169 |
| 8.3.2 Présence des difficultés attendues et typologies de raisonnements activées..... | 170 |
| 8.3.3 Utilisation des éléments du modèle..... | 172 |
| 8.3.4 Références aux situations proposées dans la séquence | 173 |
| 8.3.5 Rôle des parois | 174 |
| 8.3.6 Décomposition des forces : un point critique..... | 175 |
| 8.3.7 Obstacle à la mise en oeuvre du modèle : le seuil de compétence..... | 176 |
| 8.3.8 Bénéfices du modèle, même sans aboutissement..... | 177 |
| 8.4 Conclusions | 178 |
| 8.5 Analyses des débat 1-9 | 180 |
| CHAPITRE 9. CONCLUSIONS | 199 |
| 9.1 Les raisonnements des apprenants | 199 |
| 9.2 La séquence..... | 206 |
| 9.3 Les trois niveaux..... | 212 |
| CHAPITRE 10. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES..... | 214 |
| ANNEXE : TRANSCRIPTIONS DES DÉBATS DES ÉTUDIANTS..... | 224 |

CHAPITRE 1. INTRODUCTION

J'annonce ici, dans leurs grandes lignes, les objectifs et les fondements de ce travail, lesquels seront repris ensuite au fil des chapitres suivants.

Le sujet de cette recherche concerne les problèmes didactiques liés à l'apprentissage du concept de pression et de la statique des fluides au niveau du lycée et de la première année universitaire.

Le premier but est l'étude des conceptions des élèves concernant la pression dans les fluides et la poussée d'Archimède. Le second est l'élaboration, l'expérimentation et l'évaluation d'une séquence d'enseignement sur la statique des liquides, visant à surmonter certaines difficultés et conceptions erronées des étudiants.

Les recherches sur les conceptions des apprenants sont désormais bien développées et permettent d'avoir un cadre très riche des tendances prédominantes de la pensée commune dans le domaine de la physique.

Ces recherches ont également permis de définir quelques caractéristiques générales du raisonnement commun, des tendances transversales, des modes de pensée qui se manifestent avec une surprenante ténacité, presque partout dans la physique (Viennot 1996).

Une analyse des précédentes recherches d'autres auteurs sur les conceptions concernant la pression dans les fluides et la poussée d'Archimède sera faite dans le chapitre 2 (par. 2.1).

Ici, la recherche sur ce thème sera faite au moyen d'entretiens (chapitre 4) et de questionnaires (chapitre 5). Les questionnements proposés concernent les fluides en situation statique, surtout les liquides, mais aussi les gaz. Une comparaison entre les conceptions concernant les liquides et les gaz sera établie à partir de quelques situations physiques similaires. Au préalable, une analyse de quelques tendances générales du raisonnement commun, particulièrement importantes dans le contexte de notre recherche, sera faite dans le chapitre 3.

Etant donné le niveau scolaire indiqué, il faut chercher l'origine des raisonnements des élèves et des étudiants non seulement dans l'apprentissage lié aux expériences de la vie quotidienne, mais aussi dans l'influence de l'enseignement scolaire. Ce qu'on va trouver sera donc plutôt le résultat d'une interaction entre la pensée de l'élève et les acquis scolaires, une sorte d'élaboration et d'adaptation des contenus étudiés à l'école pour les intégrer dans le cadre préexistant des idées et des structures de raisonnement.

L'analyse préalable du contenu et de la structuration qu'on souhaite lui donner pour l'enseignement est tout à fait primordiale, une idée que le courant français d'analyse en termes de "transposition didactique" (Chevallard 1985) a beaucoup promue.

À propos de cette composante, dont le rôle central a été souligné encore récemment (Lijnse 1994, Galili et Hazan 2000, Duit 2001, voir aussi les ouvrages Fensham, Gunstone, White (eds) 1994, Bernardini, Tarsitani, Vicentini (eds) 1995), il est important de bien réaliser qu'il serait réducteur d'imaginer séparément le "quoi" et le "comment" de l'enseignement. Ce qu'on propose dans une séquence d'enseignement n'est pas seulement un contenu de la physique, mais toujours un contenu avec un éclairage particulier, fruit d'une analyse spécifique et de choix conséquents (Rainson et Viennot 1998, Viennot 1999).

Dans notre recherche, ces choix s'appuient à la fois sur l'analyse du contenu et sur l'étude des conceptions des apprenants, deux aspects qui seront toujours envisagés comme étant étroitement liés.

De plus, certains obstacles à la compréhension des élèves et des étudiants peuvent avoir leur origine aussi dans la *physique enseignée*. Certaines confusions apparaissent surtout dans des situations à la frontière entre deux domaines de la physique, étudiés d'habitude avec des systèmes conceptuels et théoriques différents, par exemple la Mécanique et la Thermodynamique (cf. Besson 1999). En outre, certaines simplifications et schématisations, normalement utilisées dans l'enseignement et qui permettent de résoudre des exercices et de faire des calculs, peuvent faire obstacle à la compréhension de la situation physique ou entrer en contradiction avec d'autres résultats ou des principes généraux de la physique (à ce propos, un exemple qui sera développé dans la suite est celui de l'affirmation très répandue que les liquides sont incompressibles).

Exercer une *vigilance* scientifique et épistémologique (Artigue 1990, Beaufils 1995) suppose que l'on soumette les descriptions simplifiées, utilisées dans l'enseignement, à une discussion critique, afin de bien définir les hypothèses et les approximations faites.

En ce qui concerne le contenu spécifique de notre étude, la statique des fluides, il faut dire que le concept de pression présente des éléments d'ambiguïté (Séré 1985a), il joue "un rôle d'organisateur cognitif" dans la description d'un grand nombre de phénoménologies concernant les fluides (Borghi et al. 1996), mais il est parfois traité de façons différentes dans des contextes différents, ce qui peut engendrer des difficultés ultérieures chez les élèves (cf. aussi Psillos et Kariotoglou 1999 p.20).

Dans le chapitre 3, quelques idées guides seront illustrées, concernant certains aspects du concept de pression dans les fluides et des raisonnements communs liés à ce sujet. Il s'agit des aspects que nous considérons les plus pertinents pour les objectifs de cette recherche et qui seront utilisés dans son développement.

Sur la base des résultats des recherches précédentes, de l'analyse des leviers susceptibles *a priori* de favoriser la compréhension, de l'observation en classe, de la recherche sur les raisonnements des élèves et des étudiants, une courte séquence d'enseignement a été élaborée, visant à surmonter les difficultés et les conceptions retrouvées chez les étudiants et à produire une compréhension plus profonde et articulée du sujet. Le savoir de référence relève de la statique des liquides en présence de gravité, les aspects cinétiques et thermiques étant exclus. Sont en cause le caractère scalaire de la pression, sa relation avec la force exercée sur un élément de surface d'orientation quelconque, et la variation de pression avec l'altitude au sein du liquide. La séquence est basée sur la proposition d'un modèle mécanique simple de liquide.

L'objectif principal visé est d'obtenir un enrichissement des ressources de raisonnement, une évolution des représentations des situations physiques et un renforcement de la capacité d'argumentation et d'explication, dans le contexte de la statique des fluides.

Une des idées guides a été de proposer un discours plus proche des conceptions des étudiants, en faisant appel à leurs propres représentations des fluides, en mettant en évidence les interactions, les corps et les forces à considérer comme causes directes de la pression dans les fluides et de la poussée d'Archimède. Le but est de provoquer ou favoriser un changement de typologie de raisonnement chez les étudiants.

Il s'agit d'une séquence très courte (2-3 heures), qui permet aussi d'examiner s'il est possible, avec des petites modifications de l'enseignement dispensé, de produire des changements très ciblés sur quelques aspects précis de la compréhension d'un domaine bien limité : ici, la statique des fluides.

L'évaluation de cette séquence est faite en utilisant des pre-tests et des post-tests, sous forme de questionnaires papier-crayon, et en analysant des enregistrements audio d'une séance finale de débats entre les étudiants.

Cette évaluation comporte deux aspects, suivant l'exemple d'autres travaux (par exemple Chauvet 1994, Méheut, Chomat et Larcher 1994). D'une part, on recueille des indications sur les acquis conceptuels des étudiants à la suite de la séquence, concernant quelques objectifs spécifiques d'apprentissage, en comparaison avec les résultats de groupes témoins ayant suivi un cours "classique". D'autre part, une évaluation interne a été menée, qui portera dans notre cas sur l'évolution des raisonnements observée dans le déroulement des débats entre étudiants et liée aux acquis de la séquence.

Suivant une idée de plus en plus développée dans la littérature didactique (cf. Colin 1999, Hirn 1998, Hirn et Viennot 2000, Viennot et al. 1999, Pinto et al. 2000), la séquence a été proposée à des groupes d'enseignants en formation, dans le but de recueillir des indications à partir de leurs réactions et de leurs évaluations sur une éventuelle utilisation en classe de la séquence.

La séquence sera décrite, dans ses prémisses, ses caractéristiques et ses contenus dans le chapitre 6 ; son évaluation fera l'objet des chapitres 7 et 8.

Les résultats de quelques travaux d'autres auteurs concernant les bases méthodologiques et théoriques pour l'élaboration de séquences d'enseignement sont illustrés au paragraphe 2.2. Quelques séquences d'enseignement sur la pression, comportant des modèles de fluide, expérimentées par d'autres auteurs, sont analysées au paragraphe 2.3. Aucune de ces recherches ne propose, cependant, un modèle qui prenne en compte l'action de la gravité et la compressibilité des fluides, qui sont au centre de notre proposition.

Dans notre démarche à la fois d'étude des raisonnements et de construction de séquence didactique, nous voudrions comprendre les images que les étudiants ont des fluides et analyser d'éventuels moyens de modifier certaines conceptions et favoriser l'acquisition de typologies de raisonnement plus riches et articulées. Il ne s'agit pas seulement de voir quelles règles et quels concepts sont appliqués dans les situations proposées : il nous semble que pour avancer dans la compréhension, il ne suffit pas de dire ce que *doit être* telle ou telle grandeur, mais aussi d'explorer comment *se produit* l'état qu'on analyse.

Nous cherchons à connecter le raisonnement *global*, formel, fondé sur les lois et formules concernant le fluide en étude, par exemple $\Delta p = -\rho g \Delta h$, et le raisonnement *local*, causal, fondé sur ce qui se passe dans un certain petit endroit du fluide, ce qui change dans les propriétés locales du liquide. Pour joindre ces deux typologies de raisonnement, il faut activer un raisonnement *systémique*, fondé sur les interactions entre les parties du fluide, sur une transmission des changements, qui puisse expliquer le *mécanisme* qui conduit à établir une nouvelle situation d'équilibre.

Un élément important dans cette articulation entre descriptions locale et globale est de cesser d'affirmer qu'un liquide est incompressible, au sens où il le serait absolument, ce qui semble exclure toute modification locale et donc toute différence concernant l'action du liquide sur la paroi ou le fluide au voisinage. Comment un élément de fluide pourrait-il transmettre au voisin l'effet d'une perturbation, si lui-même n'est en rien modifié ? Les variations de volume des liquides sont souvent négligeables dans les calculs, mais elles sont essentielles pour comprendre ce qui se passe, pour construire une explication causale. D'ailleurs, nier totalement la compressibilité des liquides signifie annuler toute une filière importante de recherche scientifique (cf. Bridgman 1958, Aitken et Tobazéor 1998).

Notre analyse conduit au choix de proposer, pour la description des fluides en présence de gravité, un modèle au niveau *mésoscopique*, ce qui permet d'envisager un contact entre les éléments bases de la modélisation. Ce niveau permet de ne pas s'engager sur ce qui justifie la répulsion entre éléments de fluide, qui est à rapporter à la cinétique moléculaire. Les objets analogues choisis pour ces unités mésoscopiques sont des balles de mousse, traitées d'abord comme des entités mécaniques, ensuite comme un modèle d'éléments de fluide.

Il faut souligner l'importance du caractère mésoscopique du modèle. Pour mettre en œuvre un raisonnement local, il faut aller au-delà d'une description purement macroscopique, en se reportant à un autre niveau, relatif à un ordre de grandeur plus petit, sur lequel construire une explication du comportement du système au niveau macroscopique.

D'ailleurs, selon Halbwachs (1971, p.30) "la physique inscrit sous la catégorie de causalité un type d'explication qui est une *réduction des phénomènes d'un niveau à ceux d'un niveau sous-jacent*". Mais ce niveau plus bas ne peut pas être, dans ce contexte, le niveau microscopique (molécules, atomes). Un modèle microscopique serait incapable de rendre compte, de façon simple, des effets du poids en forme totalement statique, car pour cela il faut que les unités du modèle soient en contact entre elles. Des boules éparses, comme des molécules, ne fonctionnent pas à cet égard. Tout modèle microscopique nécessite la prise en charge des aspects cinétiques, sans quoi il est inefficace pour rendre compte des aspects considérés ici. Si l'on veut rester dans un modèle complètement statique, on est obligé de passer à un niveau mésoscopique, de façon à cacher à l'intérieur de l'unité mésoscopique du modèle (la balle de mousse, dans notre cas) les aspects cinétiques, dont les effets sont transformés en une résistance élastique, représentée par les forces de pression.

Les balles de mousse ne sont donc pas le correspondant analogique des molécules, mais plutôt des *particules*, des *gouttelettes* de liquide.

En effet, l'analyse en termes d'éléments de fluide, à un niveau mésoscopique, est la méthode standard employée pour traiter la statique et la dynamique des fluides, la cinétique moléculaire demeurant cachée et représentée globalement, dans ses effets, par les grandeurs macroscopiques pression et température. Mais cette décomposition en petites parties est faite de façon abstraite et mathématique.

Nous avons voulu rendre accessible à l'intuition des étudiants cette décomposition mésoscopique, en évoquant des objets macroscopiques avec lesquels établir une analogie de comportement, en ce qui concerne le champ bien limité de la statique des fluides en présence de la gravité. Les petites "quantités évanescences"¹, typiques du discours du calcul infinitésimal, deviennent, dans notre modèle, des objets, qui peuvent interagir, pousser et être comprimés. C'est cela qui fait la particularité, et aussi les limites du modèle, lui-même susceptible d'intervenir seulement dans une phase limitée de l'enseignement de la mécanique des fluides.

Il faut bien dire que, si *le support* du modèle (les balles de mousse) est facilement accessible à l'intuition, l'analyse en termes des lois de la mécanique, qui décrit son fonctionnement et permet son application, ne l'est pas ; au contraire, elle demande une certaine abstraction et un minimum d'habileté en mécanique élémentaire.

¹ L'expression est utilisée par Newton (*Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*, livre I, section I, spécialement le scolium final). L'attribut "évanescence" est donné par Newton aussi bien à des parallélogrammes, des angles, des segments, des arcs, des triangles (cf. lemmes III, VI, VII, VIII, XI).

Il est évident que ce modèle ne permet pas d'aller très loin, mais il peut constituer une aide didactique, c'est notre hypothèse, pour atteindre l'objectif très spécifique et limité qu'on se pose.

L'étape de modélisation qui devrait suivre est celle qui permet de « rentrer » dans l'unité mésoscopique, ce qui amène à l'échelle microscopique des particules constituant le fluide et devra permettre une approche plus fine de l'isotropie et surtout des propriétés thermoélastiques des gaz.

A travers les éléments d'évaluation recueillis, nous attendons évidemment un éclairage a posteriori des prémisses qui ont appuyé la construction de notre séquence.

Certes, il est toujours difficile de cerner exactement les aspects d'une séquence d'enseignements qui ont été efficaces pour promouvoir l'apprentissage de l'étudiant (Rainson et Viennot 1998, Leach et al. 2001, Méheut 2001). Plusieurs facteurs interviennent dans l'interaction organisée entre enseignant et apprenant, de sorte qu'il est problématique de les séparer et de les prendre en considération individuellement. Il est donc recommandable d'être très prudent dans les conclusions à cet égard, mais il est quand même possible de retenir certains résultats sur des effets limités et spécifiques, avec des conditions définies aussi précisément que possible.

Surtout, lorsqu'on trouve des résultats différentiels, c'est-à-dire un succès sur un aspect ou sur une question, et un insuccès sur un autre, on peut bien penser que le résultat positif constaté n'est pas seulement un effet de contour ou un effet affectif (engagement des enseignants, plus d'attention des étudiants).

C'est justement ce qu'il est arrivé dans notre expérimentation (cf. chap. 7). Une analyse de ces différences de résultats conduit à les mettre en relation avec les conceptions de départ des étudiants et nous permet aussi de nous avancer un peu quant aux origines des effets positifs, en les liant aux choix centraux qui ont guidé l'élaboration de la séquence.

Chapitre 2. L'ÉTAT DE LA QUESTION DANS LA RECHERCHE DIDACTIQUE

J'illustre ici des travaux d'autres auteurs concernant les conceptions des apprenants sur les fluides et l'élaboration de séquences d'enseignement, en faisant une analyse approfondie de ceux qui sont plus proches aux thèmes de la présente recherche.

Dans le dernier paragraphe, je précise les indications principales, tirées de la littérature examinée, qui seront prises en compte dans la présente recherche.

2.1 Les conceptions des élèves

2.1.1 Piaget et les stades du développement

Je commence par Piaget et l'école de Genève. Le grand psychologue a touché maintes fois les sujets de la pression, de l'air et de la poussée d'Archimède, comme d'ailleurs presque tous les sujets de physique élémentaire, dans ses recherches sur le développement cognitif des enfants (Piaget-Inhelder 1955, Piaget-Garcia 1971).

Piaget et ses collaborateurs trouvent que pour les plus petits (stade I) l'air n'est pas une substance permanente, mais devient réel seulement quand il est en mouvement (cf. aussi Séré 1985), comme s'il était créé ou produit par les actions du sujet ou par les autres objets. L'air est évoqué souvent dans les explications, mais mal à propos et avec une inversion typique entre cause et effet (par exemple, plusieurs enfants pensent que c'est le mouvement des feuilles des arbres qui cause le vent, plutôt que l'inverse). C'est dans les stades successifs que, progressivement, l'air commence à être considéré comme une substance qui existe même si elle est immobile et qui peut agir sur les autres corps, sans apparaître et disparaître magiquement.

Ces auteurs étudient aussi les idées sur la pression dans les liquides, avec une expérience sur les vases communicants et une autre sur la presse hydraulique. Dans une autre expérience, sur la poussée d'Archimède, ils décrivent comment les enfants progressent d'une phase dans laquelle ils ne cherchent pas une explication uniforme jusqu'à l'acquisition d'une interprétation assez correcte et cohérente, en termes de comparaison entre poids de l'objet et poids d'un volume égal d'eau (vers 13-14 ans).

Il faut dire que cette description, typiquement piagétienne, d'un développement cognitif qui aboutit toujours spontanément vers la *bonne explication*, une sorte de *happy end*, semble très discutable à la lumière des recherches successives.

Plusieurs recherches ont montré en effet qu'à l'âge de 14 ans, seulement un faible pourcentage d'élèves (environ 20%) a atteint le stade III de la pensée formelle, qu'à 18 ans ce pourcentage ne dépasse pas 50%, et que même à 20 ans il reste au moins un tiers d'étudiants qui ne sont pas en mesure d'utiliser les capacités du stade des opérations formelles, et presque la moitié des autres les utilisent seulement de façon partielle (Violino & Di Giacomo 1981, Besson 1992).

La conclusion semble être que l'acquisition de ce dernier stade du développement intellectuel, ou du moins de ses indices présumés, doit être considérée comme un objectif pédagogique plutôt que comme le résultat d'un processus évolutif spontané.

2.1.2 Conceptions concernant les gaz

Séré M.G. (1982, 1985a, 1985b, 1986) étudie les conceptions de l'état gazeux qu'ont les élèves de collège âgés de 11 à 13 ans et leur évolution selon l'enseignement suivi. Après des entretiens et des observations préliminaires, elle a suivi pendant deux années scolaires un grand échantillon d'élèves (280 la première année, en 6° et 250 la deuxième, en 5°), avec un groupe de contrôle de 500, puis de 300 élèves. Elle s'est servie d'entretiens, de questionnaires, et de l'observation en classe. Elle a étudié les images que les élèves associent à l'air et aux gaz, la formation de l'idée de conservation de quantité et de masse, les idées sur les actions exercées par l'air, l'acquisition du concept de pression et la reconnaissance des différences de pression, la prise en compte de la température.

Elle montre, entre autres, que l'existence de l'air est très souvent associée au mouvement de l'air (le souffle ou le vent). Par exemple, un élève, après plusieurs mois d'enseignement en 6°, pour disposer d'un flacon plein d'air, propose "d'aller le remplir dans la cour, en courant face au vent" (Séré 1985a p.77). Elle suggère aussi que l'idée de vent puisse être plus primitive que celle d'air (elle fait à ce propos une jolie remarque sur les idéogrammes utilisés pour ces mots en chinois et en japonais, qui sont plus simples pour "vent" que pour "air", p.77).

Par une simple expérience, dans laquelle on pousse et on tire le piston d'une seringue, elle montre (p.110-114) que pour beaucoup d'élèves les gaz n'exercent des actions que lorsqu'ils sont en mouvement ou si l'on exerce une action sur eux ("l'air ne pousse que quand il est poussé") ou encore si on les chauffe. Et ils exercent une action dans une seule direction, celle de la force appliquée ou du mouvement. D'ailleurs les phases de mouvement sont celles que les élèves interprètent le plus volontiers ; spontanément, ils ne considèrent même pas les phases d'équilibre, puisqu'il ne s'y passe rien (p.276).

L'idée de pression est assimilée à celle de *tassement* et/ou à celle de *force*. Dans les transformations, les élèves comparent rarement de façon spontanée l'avant et l'après, l'intérieur et l'extérieur. Ils considèrent *un seul système à un seul moment* (p.139). Quand on leur demande d'établir une comparaison, les résultats sont meilleurs pour comparer l'avant et l'après que pour comparer l'intérieur et l'extérieur. Ils comprennent donc mieux une évolution temporelle dans un seul espace que la prise en compte et la mise en relation de deux systèmes à un moment donné.

Les élèves ont une intuition assez sûre des mouvements des gaz d'une enceinte vers une autre, mais ils en tirent peu de conséquences pour la valeur de la pression dans les enceintes considérées. Cette intuition pourrait être utilisée dans l'enseignement pour favoriser la formation de l'idée d'égalisation des pressions.

L'air atmosphérique est dit *normal* et beaucoup d'expériences sont interprétées en termes de *retour à la normale*. Souvent à l'air "normal" est attribuée une pression nulle. Il semble exister un schème d'attribution de la valeur zéro à tout ce qui caractérise le repos.

Les élèves considèrent que les gaz avec une pression supérieure à la pression atmosphérique exercent une action, une poussée sur les objets, tandis qu'ils envisagent très rarement l'existence de ces forces dans le cas des gaz à pression inférieure, qui sont plutôt censés agir par aspiration ou succion.

Pisani (1982) étudie l'utilisation par les adultes des notions de pression et de chaleur. Elle interroge en entretien 30 employés EDF-GDF au sujet de quelques situations opératoires simples (cafetière, briquet, ventouse, ballon, cocotte).

Elle trouve que, généralement, ils ne tiennent pas compte des caractéristiques de

l'environnement extérieur au système (l'atmosphère, sa pression, sa température, p.132) ; ils parlent plus souvent d'une pression seule et non d'une différence entre deux pressions (p.61) et considèrent la pression comme le moteur d'un mouvement ou d'une déformation, en lui prêtant les effets d'une force (p. 63, 64, 69, 78). Au contraire, quand ils considèrent une variation de pression, celle-ci est rarement mise en relation avec le mouvement et ne recouvre pas la notion de force : elle est plutôt employée, d'une façon plus proche de celle du physicien, pour décrire l'évolution de l'état d'un système.

Les raisonnements impliqués sont de deux types : soit une corrélation entre les variations simultanées de grandeurs physiques, soit un enchaînement causal d'effets dans le temps, le second étant beaucoup plus fréquent (p. 73-74). Un système qui évolue est plus souvent décrit qu'un système en équilibre.

Dans la situation du ballon, l'existence d'un gradient de pression dans l'atmosphère n'est absolument pas perçue comme une des conditions de la montée du ballon (p.66).

Il semble aussi que les personnes interrogées attribuent à la pression des propriétés du fluide matériel en étude : ils disent que "la pression est enfermée dans la cafetière", "elle est emmagasinée dans la cocotte", "elle s'en va par la soupape" etc. (p.70). Une sorte de substantialisation de la pression.

La relation entre la gravité et la pression de l'air a été étudiée par des chercheurs italiens (cf. Ruggiero, Cartelli, Dupré, Vicentini 1984, Dupré 1986, Noce, Torosantucci, Vicentini 1988). Ils trouvent que plusieurs élèves considèrent l'air comme un facteur nécessaire pour l'action de la gravité. En absence d'air il n'y aurait pas de gravité, ni de poids et les objets ne tomberaient pas. Selon cette conception, la pression de l'air favorise la chute des corps et en altitude le poids est plus faible, car l'air y est plus rare. J'ai trouvé cette idée évoquée par l'élève D. dans l'entretien rapportée au chapitre 4.

Borghi L. et al. (Borghi L., De Ambrosis A., Massara C.I., Grossi M.G., Zoppi D. 1988), à Pavie, en Italie, ont étudié les idées des enfants de 6 à 8 ans concernant l'air et ses propriétés, avec des entretiens, avant et après un ensemble d'activités comportant des expériences et des débats sur celles-ci.

Les typologies d'explications que les auteurs trouvent chez les enfants sont les suivantes : a) des explications pre-causales (descriptives, finalistes), b) des réponses qui ne révèlent la perception de l'air que quand il est en mouvement, c) des réponses qui font référence aux fonctions de l'air en relation avec la vie, d) des explications qui font référence à une seule propriété de l'air, e) des explications qui font référence à plus d'une propriété de façon correcte. Les explications les plus fréquentes, avant expériences, sont les deux premières pour les enfants plus petits et les quatre premières (presque le même pourcentage) pour les plus grands. Après les expériences, la typologie d) devient majoritaire, suivi de près par la e) et la b).

Stavy (1988), en Israël, étudie les conceptions des élèves sur les gaz avant et après enseignement. L'échantillon est constitué de six groupes de 20 élèves, un groupe pour chaque niveau de scolarisation, du quatrième au neuvième niveau, les élèves étant donc âgés de 9 à 15 ans. Le sujet "Structure de la matière" est traité au septième niveau. Elle présente aux élèves une tablette au CO_2 et un verre d'eau, pour préparer du soda et demande d'expliquer s'il y a changement de poids dans la tablette, avant et après la préparation du soda. Ensuite elle présente un verre de soda et demande s'il y a changement de poids après la fuite des bulles de gaz et ce qui arrive à ces bulles. Enfin elle demande une définition du mot "gaz".

Le pourcentage de réponses correctes à la question sur la tablette est assez élevé, d'environ 60% avant enseignement et de 90% après enseignement. Le pourcentage de réponses correctes à la question sur le verre de soda semble être du même type, avec une importante hausse après enseignement, mais les valeurs sont beaucoup plus faibles, de 20% à 60% environ. Les réponses non correctes sont de deux types : le poids diminue, parce que le gaz donne de la *légèreté* et lorsqu'il s'en va, l'eau devient plus lourde (de 20% de réponses à 10% jusqu'à zéro), le poids ne change pas (de 60% à 30%). Les justifications pour cette dernière réponse sont différentes : soit parce que le gaz n'a pas de poids (de 30%, en diminuant de façon régulière jusqu'à 5%), soit parce que le contenu des bulles demeure dans l'eau et que le volume d'eau ne change pas.

Les définitions du mot "gaz" sont données :

- a) moyennant des exemples (gaz de cuisine, air, vapeur...) ;
- b) comme une forme, un état de la matière défini par ses propriétés; c) en relation avec une théorie microscopique de la matière (distance entre particules, vitesse, ...).

La première typologie est fortement majoritaire aux niveaux 4, 5 et 6, puis chute au niveau 7 et disparaît au niveau 8. La deuxième apparaît faiblement aux niveaux 5 et 6 (20%), devient majoritaire au niveau 8 et puis diminue. La troisième typologie apparaît seulement au niveau 8 (25%) et devient majoritaire (80%) au niveau 9.

On trouve que les enfants ont des difficultés à considérer le gaz comme une substance et à comprendre la conservation du poids dans l'évaporation, qu'il leur faut beaucoup de temps pour intégrer les nouvelles idées apprises à l'école, que leurs idées peuvent changer selon la tâche proposée.

Rozier (1988) montre que les étudiants au niveau universitaire, dans leurs explications concernant les gaz, font une *association préférentielle entre pression et densité* du gaz. Au niveau microscopique, ils font une assimilation entre pression et nombre de chocs des molécules, ce dernier étant associé strictement à la concentration moléculaire (p. 67, 68, 74, 233), donc à la densité. Ils ont tendance à ne pas considérer la force des chocs ni la vitesse, préférant les facteurs de type spatial (p.68), attitude qui serait un exemple d'une tendance plus générale à la *spatialisation du raisonnement*.

De Berg (1992), en Australie, étudie le raisonnement des élèves dans un contexte semi-quantitatif face à une situation concrète, en se focalisant sur les relations entre les variations de pression et de volume d'une quantité fixe d'air, à température constante.

Il propose à 101 élèves anglais, âgés de 17 à 18 ans, une manipulation simple: dans une burette il verse un liquide coloré, qui coule du bas de la burette, ensuite il ferme avec un bouchon l'entrée supérieure de la burette. On voit alors que, après la tombée de quelques gouttes encore, le liquide ne coule plus.

Il demande aux élèves une explication écrite du fait que le liquide ne coule plus.

Il analyse les *idées clés*, "*key ideas*", des élèves, en les rangeant dans trois catégories correspondant à trois *foyers* ("*focus*" en anglais) de leur raisonnement :

- a) 74%. Les propriétés de l'air enfermé sont différentes de celles de l'air libre. Exemple : l'air enfermé n'exerce pas de pression, l'espace fermé devient un vide.
- b) 10%. L'action du bouchon empêche l'écoulement du liquide. Exemple : le bouchon met sous pression la burette et fait arrêter le liquide, le bouchon fait sortir l'air.
- c) 16%. Raisonnement en termes de différence ou équilibre de pression. Exemple : la pression externe étant supérieure à la pression interne, le liquide s'arrête parce que la pression de succion est égale à la force de gravité sur le liquide.

On peut noter que l'explication suggérée par l'auteur comme correcte (p.301), ne l'est pas vraiment.

Il écrit : "Un peu de liquide sort encore parce que la pression qui agit vers le bas, sur la pointe, [dans la partie inférieure de la burette] est supérieure à la pression atmosphérique. Lorsque le volume de l'air dans la burette augmente, sa pression diminue, jusqu'à ce que la pression qui agit vers le bas sur la pointe devienne égale à la pression atmosphérique externe."

Or la pression du liquide au fond de la burette est toujours égale à la pression externe, selon la loi des actions réciproques. Et dans les couches immédiatement supérieures, elle est plus faible.

Dans un liquide en chute libre, la pression est partout égale à la pression atmosphérique, sauf fluctuations locales. Le liquide tombe à cause de la gravité. Pour l'arrêter, il faut un gradient de pression. Il ne demeure pas immobile parce que sa pression au fond est égale à celle de l'air externe, ce qui arrive aussi pendant qu'il tombe, mais plutôt parce qu'il y a une différence de pression entre l'air en bas et l'air en haut, qui compense l'action de la gravité.

Il me semble voir à l'œuvre chez cet auteur certaines caractéristiques du raisonnement commun, par exemple celle d'établir s'il y a équilibre ou mouvement en faisant une comparaison entre deux forces agissant sur deux objets différents, au lieu de faire un bilan des forces agissant sur l'objet en étude. Et l'on voit apparaître l'idée de *la force de l'objet*, même si elle est déguisée en pression. De plus, il est étrange que la gravité soit absente dans l'explication proposée, peut-être est-elle englobée dans la pression du liquide, qui pousse vers le bas.

2.1.2 Conceptions concernant les liquides

Engel et Driver (1985), en Angleterre, interviewent 84 élèves, âgés de 12 à 16 ans, dans le but d'identifier les structures de raisonnement de la pensée commune concernant la pression dans les fluides.

Plus exactement, elles veulent tester deux idées : que la pression dans les liquides augmente avec la profondeur et agit de la même façon dans toutes les directions, que l'atmosphère "exerce" une (force de) pression. Pour la première idée, sur la pression dans les liquides, elles proposent aux élèves des situations concrètes concernant des poissons dans des récipients et un sous-marin dans la mer, en demandant de comparer la pression "exercée par" l'eau à des profondeurs différentes, dans deux récipients de différentes largeurs, vers le bas et de côté. Pour la deuxième idée, sur la pression de l'atmosphère, elles proposent des situations comportant une bouteille avec du jus d'orange à boire avec une paille, une seringue avec laquelle on prend de l'eau d'un récipient, une tasse lavée à l'eau chaude et ensuite appuyée renversée sur une surface plane.

Elles cherchent des structures explicatives, ou "frameworks", assez générales, utilisées par les élèves dans plusieurs situations.

Elles trouvent que la plupart des élèves (de 73% à 82%) pensent que la pression augmente avec la profondeur, mais pour 40% d'entre eux la pression dépend aussi du volume total du liquide (elle serait donc plus grande dans le récipient plus large) ; presque la moitié pensent que la pression agit seulement vers le bas ou qu'elle est plus forte vers le bas que sur les côtés. Les auteurs suggèrent que les élèves appliquent aux liquides leur expérience des corps solides, pour lesquels *"le poids agit verticalement vers le bas"* (p.142).

Parmi les élèves qui considèrent une pression égale dans toutes les directions (19%), il y en a plusieurs qui associent la pression au mouvement du liquide, envisageant donc une

conception dynamique de la pression.

En ce qui concerne la pression de l'atmosphère, les auteurs identifient trois structures principales de raisonnement : celle en termes de différence de pression entre intérieur et extérieur (de la paille, de la seringue, de la tasse), qui serait d'ailleurs l'explication "correcte", celle en termes de la seule pression atmosphérique extérieure, celle en termes de *force du vide* ou de succion (ex. : "tu sucres tout l'air de la paille, et comme ça on crée du vide dans la paille. Et là où il y a le vide, il suce (il tire vers le haut) le liquide." p.139).

Giese (1987) retrouve certains résultats de Engel et Driver et, en plus, l'idée assez répandue selon laquelle la pression augmente avec la distance horizontale entre le point considéré et la paroi du récipient.

Stachel et Stavy (1985) ont étudié les idées des enfants (200 élèves de 5 à 13 ans) sur les solides et les liquides, en se focalisant sur la capacité de discriminer entre les solides et les liquides et les critères utilisés pour cette distinction.

McClelland (1987) fait une analyse du concept physique de pression et critique les ambiguïtés assez diffuses sur le sujet.

Closset (1993) a étudié, en collaboration avec Blondin, Lafontaine D., Lejoly, Lafontaine A., les raisonnements des étudiants au sujet des circuits hydrauliques, en faisant aussi une comparaison avec les résultats obtenus sur les circuits électriques.

Les auteurs rapportent les résultats du passage, chez 92 étudiants en première année universitaire, d'un questionnaire comportant cinq questions, dont deux concernant les circuits électriques et trois les circuits hydrauliques, avec une forte similitude entre les situations proposées dans les deux domaines.

Les circuits hydrauliques proposés (voir figures 1, 2 et 3) sont très simples et tous en régime stationnaire: le premier comporte une pompe et une conduite horizontale, avec une partie plus étroite et l'autre à section constante; le deuxième présente en plus une ramification, avec encore, dans chaque branche, une partie plus étroite (de différente section dans les deux branches) ; le troisième ne diffère du premier que par le fait qu'il a deux parties distinctes plus étroites (égales) au lieu d'une seule.

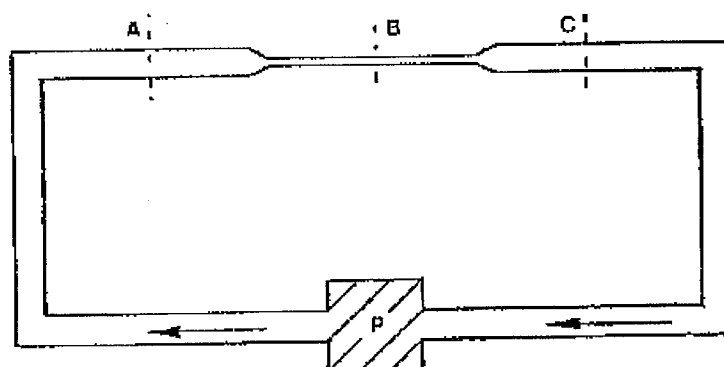


Fig. 1

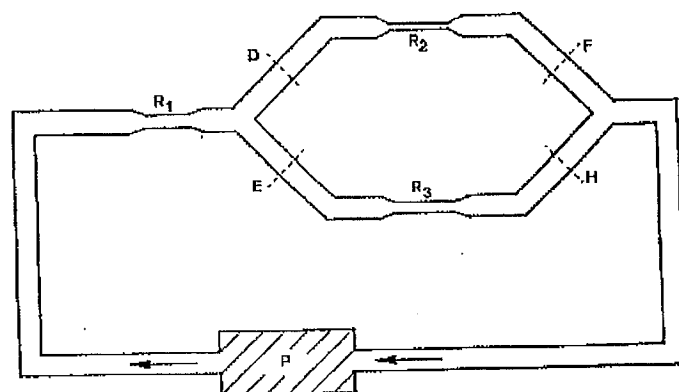


Fig. 2

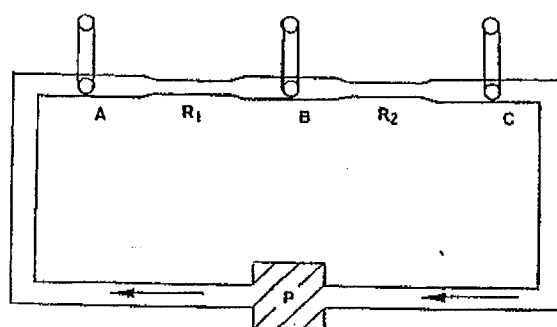


Fig. 3

On demande de comparer le débit, la vitesse et (seulement dans le troisième) la pression dans les différentes parties du circuit, avant et après une variation de la section ou de la vitesse de la pompe.

Les auteurs mettent en évidence quatre typologies principales de raisonnement : *local*, *séquentiel*, *à débit constant*, et *systémique*, celui à débit constant étant majoritaire.

La comparaison avec les circuits électriques montre que les mêmes typologies de raisonnement apparaissent, mais avec une forte différence de pourcentage entre le séquentiel et le débit constant. Dans les circuits électriques le *séquentiel* est nettement majoritaire et le *débit constant* est très faible, tandis que dans les circuits hydrauliques, c'est l'inverse.

A la question sur la pression, dans le troisième circuit, la réponse majoritaire (54%) est que la pression est constante dans tout le circuit.

En Grèce, un groupe de recherche (Psillos, Kariotoglou et al.) de l'Université de Thessaloniki a étudié les conceptions des élèves du collège sur la pression dans les liquides et a élaboré et expérimenté des stratégies d'enseignement sur l'hydrostatique.

Dans une première recherche Koliopoulos, Kariotoglou et Psillos (1986) ont proposé 5 questions écrites à 60 élèves entre 13 et 14 ans, après l'enseignement prévu par le programme officiel. Ensuite ils ont soumis 8 élèves du même échantillon à deux entretiens.

Les questions, accompagnées d'un petit dessin, étaient les suivantes :

Q1) Etant donné un bateau avec deux trous à deux différentes profondeurs sous la surface de l'eau, par quel trou l'eau entre-t-elle plus violemment ?

- Q2) Comparer les pressions que "subissent" deux plongeurs dans la mer à deux différentes profondeurs, sur la même verticale.
- Q3) Même question de Q2 pour deux plongeurs à la même profondeur, mais avec un bateau à la surface de l'eau, sur la verticale de l'un des deux plongeurs.
- Q4) Comparer la pression que *subissent* les fonds de deux récipients de différente largeur, mais avec la même hauteur d'eau.
- Q5) Même question et même situation de Q4, mais avec en plus un objet qui flotte dans le récipient plus étroit.

Les pourcentages de réponses correctes sont respectivement 80%, 90%, 10%, 40%, 20%.

Les justifications principales sont les suivantes :

Q1 et Q2 : plus on descend dans l'eau, plus la pression augmente ;

Q3 : le poids du bateau exerce une pression complémentaire, donc la pression est plus grande pour le plongeur au-dessous du bateau ;

Q4 : la pression au fond du récipient plus large est plus grande, parce qu'il y a plus d'eau ; la pression est plus grande au fond du récipient plus étroit, car le récipient comprime le liquide ou car les molécules d'eau sont plus serrées ; plus la surface du fond est petite, plus la pression est grande, étant $p=F/S$.

Q5 : pour la majorité des élèves la pression est plus grande au fond du récipient plus étroit, l'objet presse l'eau, qui à son tour presse le fond.

Dans les entretiens, quelques élèves ont dit que l'eau n'exerce pas de pression sur les parois, mais qu'au contraire, ce sont les parois qui *exercent* une pression sur l'eau, puisqu'ils l'enclosent.

Dans un autre article Kariotoglou, Psillos et Vallasiades (1990) analysent le concept de pression et la statique des fluides tels qu'ils sont présentés dans six manuels de physique générale, anglais et grecs, pour l'université et pour le secondaire. Ils proposent ensuite une classification des conceptions des élèves sur la pression dans les liquides, en trois *modèles de pression* ("pressure models"), allant du plus simple au plus élaboré et donc proche de la conception du physicien :

- Le modèle de *la foule entassée*, avec un écho anthropomorphique, selon lequel la pression est plus grande dans un récipient plus petit, parce que le liquide est entassé, comprimé. Dans ce modèle les élèves considèrent, de façon plus ou moins explicite, que la densité du liquide est variable (Kariotoglou et Psillos 1993, p.101).
- Le modèle pression-force, basé sur une identification de la pression avec la force pressante, en tant que vecteur. C'est le modèle le plus répandu parmi les élèves et il les amène, par exemple, à conclure que la pression est plus grande au fond du récipient plus large, parce que le poids du liquide est plus grand.
- Le modèle *liquide* ou *liquidité*, "liquidness model", dans lequel la pression est considérée comme une propriété du liquide et/ou une fonction du point. Peu répandu, ce modèle est le plus proche du modèle scientifique, selon les auteurs.

Cette classification est reprise et approfondie dans l'article (Kariotoglou et Psillos 1993). Dans cet article, les auteurs présentent une recherche comportant des entretiens approfondis à 10 élèves grecs de 14 ans, juste après l'enseignement de la statique des fluides, et le passage d'un questionnaire à 214 élèves de 9 écoles différentes. Le protocole des entretiens, repris dans le questionnaire, concerne des situations similaires à celles de l'article (Koliopoulos, Kariotoglou et Psillos 1986), que j'ai décrit plus haut, mais avec plus d'attention que dans les recherches précédentes à l'emploi d'expressions du type "le liquide exerce une pression" ou "il y a pression au point donné" ou "le liquide a une pression". Le protocole comporte 4

questions. Dans les trois premières, on demande de comparer la pression dans deux récipients de différentes largeurs, à la même profondeur. Dans la quatrième, on demande de comparer la pression ressentie par trois plongeurs à la même profondeur, le premier ayant au-dessus, sur sa verticale, un bateau, le deuxième un rocher, le troisième n'ayant rien.

La propriété caractéristique du modèle de *la foule entassée* est le fait que la densité du liquide soit considérée comme variable, même si souvent cela n'est pas explicité par les élèves. Par exemple : "le récipient est plus petit et donc l'eau est plus condensée", "la pression est plus grande dans le puits, parce que c'est un espace fermé... comme l'air dans une petite enceinte est plus dense (tassé) et a une pression plus élevée" (p.100).

Dans le modèle de *pression force*, la pression est souvent identifiée avec le poids du liquide.

Du dépouillement des questionnaires, les auteurs concluent que leur classification explique bien les réponses des élèves aux trois premières questions, c'est-à-dire dans des situations avec des récipients de différentes largeurs, ($14 \div 19\%$ pour la *foule entassée*, $21 \div 29$ pour la *pression force*, $30 \div 42\%$ pour la *liquidité*, pour un total de $75 \div 85\%$), mais elle n'est pas efficace dans la 4^{ème} question, parce que la plupart des justifications ne rentrent bien dans aucun des trois modèles.

Les auteurs insistent sur le fait que beaucoup d'élèves, après enseignement, n'ont pas accepté l'idée que *les liquides sont incompressibles* et que leur densité est constante, une propriété qui ferait partie du *modèle scientifique du liquide*. Au contraire une des idées guides de notre recherche est que les liquides doivent être considérés comme compressibles, avec une densité variable, même si ces variations sont en général très petites et souvent négligeables dans les calculs. Petites, mais pas nulles. Je reviendrai sur ce point dans la suite (voir chap. 3).

Dans une étude ultérieure sur le sujet, les mêmes auteurs proposent une stratégie didactique visant à bien différencier les concepts de pression et de force pressante (Kariotoglou, Koumaras et Psillos 1993 et 1995 ; je ferai référence au deuxième article, plus complet). Ils expérimentent un programme de 16 heures de cours sur la statique des fluides dans des classes de seconde année du Gymnasium (13-14 ans). Ils étudient en particulier deux classes, pour un total de 58 élèves, avec un groupe de contrôle de 214 élèves.

Ils analysent les différences principales entre le modèle *pression-force* des élèves et les concepts scientifiques de pression et de force. Les élèves utilisent une *notion parente* générale et floue, la pression-force, qu'il faut désintégrer dans les deux *notions filles* de pression et de force. Mais les filles ne sont pas égales : le concept de pression a un statut plus *faible* et il est dominé par le concept de force qui a un statut *fort*.

Parmi les différences entre force et pression, ils concluent que *l'additivité de la force* opposée à *la non additivité de la pression* est celle qui peut mieux être utilisée dans la séquence d'enseignement, parce qu'elle peut faire l'objet d'une vérification à partir d'expériences basées sur des mesures et elle peut être facilement saisie par les élèves.

La stratégie, qui se veut constructiviste, comporte quatre phases :

- 1) Amélioration de la notion faible : la pression est introduite comme une grandeur physique primaire et non à partir de la formule $p=F/A$, qui devient au contraire une relation entre deux grandeurs distinctes; les conceptions intuitives proches du modèle scientifique sont renforcées (par exemple, la pression augmente avec la profondeur).
- 2) Distinction entre les *notions filles*, à travers la création d'un *conflit cognitif* chez les élèves, au moyen d'expériences qui mettent en évidence la non additivité de la pression.

- 3) Application de la nouvelle connaissance à d'autres expériences, pour en montrer l'efficacité et la supériorité.
- 4) Acquisition de la relation correcte entre pression et force pressante.

Pour l'évaluation de la séquence, les auteurs utilisent des tests après enseignement et des post-post tests, passés 8 mois plus tard. Les différences entre le groupe expérimental et celui de contrôle sont très fortes, surtout pour le post-post test, en tout cas elles sont significatives à un niveau $p=0,05\%$.

En marge, il faut dire que l'analyse du contenu faite par les auteurs dans l'annexe à l'article véhicule une explication physique qui ne me semble pas complètement correcte. Ils écrivent :

"la différence de pression entre deux points d'un liquide s'exprime... $p=\gamma h$ [γ indique le poids volumique] ... La force sur le fond est égale à $F=\gamma \cdot h \cdot S$...

Dans ce calcul, nous ne prenons pas en compte les forces sur les côtés et le fond, dues à la pression atmosphérique, pour la raison suivante : l'ensemble du système (récipient + liquide) est considéré comme étant dans l'atmosphère, ce qui implique que les forces dues à l'atmosphère sont exercées à la fois sur les faces interne et externe du récipient et du liquide. Le résultat est que la force totale de l'atmosphère sur le récipient est égale à zéro."

De cette façon la pression atmosphérique est effacée des calculs, parce que "*la force totale de l'atmosphère sur le récipient est égale à zéro*", ce qui n'est pas vrai dans le cas considéré, d'un récipient ouvert au-dessus et rempli de liquide jusqu'à un certain niveau (comme un verre d'eau). Les auteurs suggèrent que l'air exerce une force aussi dans la face interne du récipient, même où il y a le liquide. Ils écrivent aussi que la pression atmosphérique "*est la même en tout point du liquide*".

Ces citations me semblent un exemple de confusion entre *cause efficiente* et *cause contingente* (cf. par. 3.3) : la force due à l'atmosphère devient aussitôt la force de l'atmosphère sur le récipient, dont la résultante serait donc *égale à zéro*. Elles montrent aussi une certaine confusion entre une *description globale* et une *description locale*.

Les auteurs concluent que la force pressante totale exercée par l'eau sur le récipient est additive (p.69 et 90), ce qui n'est pas vrai en général. Il suffit d'examiner le cas plus simple de deux récipients cylindriques et égaux pour s'apercevoir que la force pressante n'est pas toujours additive. En effet, la force exercée par l'eau sur le fond de chaque récipient est, en notations usuelles (μ est la masse volumique de l'eau, A est l'aire du fond des récipients) :

$$F_1 = p_1 \cdot A = (p_{atm} + \mu g h_1) \cdot A \quad \text{dans le récipient 1,}$$

$$F_2 = p_2 \cdot A = (p_{atm} + \mu g h_2) \cdot A. \quad \text{dans le récipient 2.}$$

Si l'on verse toute l'eau dans un seul des deux récipients, la hauteur de l'eau sera $h=h_1+h_2$ et la force F exercée par l'eau sur le fond du récipient devient (on néglige la différence de pression atmosphérique entre les hauteurs h, h_1, h_2) :

$$F = p \cdot A = (p_{atm} + \mu g h) \cdot A = (p_{atm} + \mu g h_1 + \mu g h_2) \cdot A = F_1 + F_2 - p_{atm} \cdot A,$$

donc F n'est pas égale à $F_1 + F_2$, mais (beaucoup) plus petite. De façon encore plus évidente, l'additivité de la force n'est pas vérifiée dans le cas de récipients de forme irrégulière.

C'est le poids qui est additif et en effet les auteurs considèrent que la force exercée par

le liquide sur le fond d'un récipient à parois verticales est égale au poids du liquide, ce qui n'est pas vrai (même si on trouve cette conclusion dans d'autres textes, par ex. Encyclopédie Quillet 1994, p.223) : cette force est égale au poids du liquide *plus* la force pressante de l'air sur la surface libre du liquide. Ce qui ne fait pas une petite différence, quant à son intensité : pour un récipient cylindrique avec 20 cm d'eau, la force pressante de l'air sur la surface libre de l'eau est d'environ 50 fois le poids du liquide.

2.1.3 La poussée d'Archimède

Mullet et Montcouquiol (1988) étudient les relations, envisagées par des élèves de 13-14 ans, entre la poussée d'Archimède et différents facteurs, tels que le volume du solide, la densité du solide ou du liquide, la profondeur d'immersion, la position (horizontale ou verticale) de l'objet. La densité du liquide et le volume de l'objet sont les deux facteurs pris en compte par la plupart des élèves, mais le plus souvent séparément. Les couples de variables le plus souvent utilisés sont : volume du solide et densité du liquide, profondeur d'immersion et position du solide. Certains utilisent plus de deux variables.

Andreani Dentici, Grossi, Borghi, De Ambrosis, Massara (1984), à Pavie, en Italie, étudient les idées des enfants de 6 à 8 ans concernant la flottaison, avec des entretiens, avant et après un ensemble d'activités comportant des expériences et des débats.

Pour la flottaison ils trouvent des explications pre-causales (descriptives, finalistes), qui font référence au seul poids, au type de matériel, à la poussée de l'eau, à plus qu'une variable, correctes. L'explication la plus fréquente est celle qui fait référence au seul poids.

2.2 Les stratégies de changement conceptuel

Une fois connues les conceptions des élèves, comment faire pour qu'ils les changent en faveur de la science acceptée ?

Une première idée est de leur montrer quelques expériences qui soient en contradiction avec leurs conceptions erronées, dans l'espoir de provoquer un *conflit cognitif*, qui les amène à abandonner leurs idées erronées.

La tâche, en vérité, n'est pas si simple. Parfois, ils ne reconnaissent pas la contradiction que l'enseignant détecte ou ils la considèrent comme un "accident", une exception, qui ne concerne pas les autres cas. Il arrive aussi qu'ils ne voient pas du tout l'effet montré, qu'ils voient autre chose que ce qu'il voit l'enseignant ou qu'ils préfèrent déclarer trompeuse l'expérience, et non leur conviction, si bien établie et tant de fois confirmée.

S'ils acceptent la contradiction et entrent dans un conflit cognitif, cela ne signifie pas que l'affaire soit réglée. Ils peuvent bien abandonner (pour combien de temps ?) leur conception, sans pour autant accepter celle qui est proposée par l'enseignant. Quitte à revenir en arrière plus tard.

L'élève est alors effectivement *déstabilisé*, mais il faut à ce point là le stabiliser à nouveau dans la nouvelle conception. En évitant en plus que l'élève trouve une forme de *coexistence pacifique* entre les deux conceptions, du type chacun est roi dans son royaume, la connaissance commune étant dominante dans la vie "normale" et la connaissance scientifique (ou scolaire) à l'école et dans des situations exceptionnelles.

Il s'agit de comprendre à quelles conditions l'élève devient disponible à accueillir cette nouvelle conception.

Hewson P.W. (1982), Strike et Posner (1982), Posner et alt. (1982), Hewson et Hewson (1983) ont étudié ce problème et ont élaboré un *modèle de changement conceptuel* (« *conceptual change model* », CCM, en anglais), repris et approfondi ensuite par nombreux auteurs, par ex. Hashwet (1986), Hewson P.W. et Thorley (1989), White et Gunstone (1989), Nussbaum (1989), Driver (1989) (qui trace aussi un cadre des recherches précédentes et propose des nouvelles directions de recherche), Rollnick et Rutherford (1993).

Ces auteurs refusent une attitude *empiriste*, pour adopter une perspective *constructiviste*, posant l'activité du sujet au centre du processus de formation de la connaissance, soit celle de la science et de la communauté scientifique ou celle de l'élève en classe ou des gens dans la vie commune.

Ils pensent que l'acquisition d'une nouvelle conception scientifique demande à l'élève une véritable *révolution conceptuelle*, comparable aux révolutions scientifiques de l'histoire de la science. En voulant emprunter la terminologie de la théorie piagétienne, il s'agit d'un processus d'*accommodation*, plutôt que de simple *assimilation*.

Et pour qu'il y ait ce changement conceptuel, il faut que certaines conditions soient satisfaites. Elles sont l'*insatisfaction* à l'égard des conceptions habituelles, l'*intelligibilité* de la nouvelle conception, sa *plausibilité*, du moins comme hypothèse initiale, sa *fécondité*, pour résoudre des difficultés antérieures, intégrer les aspects positifs de la vieille conception, ouvrir de nouvelles possibilités.

Mais les nouveaux concepts ne sont pas isolés, ils doivent se mettre en relation avec un *milieu conceptuel* très complexe. Et pour que le changement conceptuel se réalise, il faut que ce milieu, cette *écologie conceptuelle* ait certaines caractéristiques favorables, qui concernent les aspects suivants :

- 1) *les anomalies*, c'est-à-dire les défaillances et les lacunes spécifiques d'une idée ;
- 2) *les analogies et les métaphores* possibles ;
- 3) *les engagements épistémologiques* : quels types d'explications sont considérés acceptables, l'existence de points de vue généraux sur la connaissance, comme l'élégance, l'économie, la simplicité ;
- 4) *les croyances et les concepts métaphysiques* sur la science, comme l'existence d'un ordre dans l'univers, d'une symétrie, le refus du hasard, la croyance en un temps absolu ;
- 5) *les autres connaissances*, dans d'autres champs, qui peuvent être compatibles ou compétitives avec la nouvelle conception.

Hewson P.W. (1982), en Afrique du Sud, a appliqué le CCM dans le contexte de l'enseignement de la théorie de la Relativité restreinte, Hewson et Hewson (1983) dans un enseignement concernant les concepts de masse, volume et densité.

Quelques auteurs, entre autres Hewson P.W. et Thorley (1989), White et Gunstone (1989), insistent sur le fait qu'il est important que l'élève participe explicitement en classe à une réflexion et à une discussion sur les caractéristiques des conceptions activées, qu'il fasse un discours *sur* les conceptions, pas seulement *avec* ou *dans* celles-ci, une *métaréflexion*, (« *metalearning* », en anglais), dans lequel il joue un peu à l'épistémologue, pour discuter les conditions de plausibilité, intelligibilité, fécondité, insatisfaction, et devenir plus conscient de son propre processus d'apprentissage.

White et Gunstone (1989), en Australie, étudient eux aussi comment favoriser l'activation de ce *metalearning*, et ils décrivent un projet ayant justement ce but ("PEEL project"). Ils

en tirent quelques principes généraux, comme l'importance du contexte, des supports extérieurs, de l'accord entre élèves et enseignants sur les objectifs du travail, de la motivation personnelle, de la variété des méthodes, du travail d'équipe, de se poser des objectifs à long terme.

Hashwet (1986), en Israël, souligne qu'il faut bien comprendre et contrôler les trois parties du processus de changement conceptuel : l'abandon ou la limitation d'une conception, l'acquisition d'une nouvelle conception, la restructuration cognitive. L'auteur étudie les facteurs qui influencent chacune de ces trois parties.

Selon Clement, Brown et Zietsman (1989), USA, les conceptions des élèves ne sont pas toutes des entraves à l'apprentissage, il y en a qui constituent de bons points d'ancrage, *anchoring conceptions* ou *bridging analogies* en anglais, pour bâtir une conception plus efficace et plus proche de celle considérée comme scientifique. Ils proposent des exemples concernant la mécanique.

Une idée similaire est proposée par diSessa (1982), quoique dans un autre contexte de référence, celui des "*primitives phénoménologiques*", *p-prims* en abrégé, structures explicatives élémentaires et primitives, construites par abstraction et généralisation d'observations de la vie courante. Il propose de favoriser l'activation de *p-prims efficaces*, qui puissent plus facilement conduire vers la physique de l'expert. D'ailleurs, selon cet auteur, les idées spontanées ne sont pas complètement abandonnées par le physicien expert, elles sont mises à part et utilisées parfois comme une aide heuristique intuitive, dans une phase préliminaire de recherche. Dans ce sens, la différence la plus importante entre raisonnement commun et raisonnement scientifique n'est pas dans les contenus, mais plutôt dans l'organisation du système de contrôle du raisonnement, plus complexe et profonde pour l'expert. L'auteur s'intéresse à la transition du raisonnement de *naïf* à *novice* à *expert*.

La base expérimentale de sa recherche consiste en 12 heures d'entretiens profondes avec 4 étudiants de première année universitaire. Ce qu'il propose est une direction de recherche, les données expérimentales n'étant pas suffisantes pour des conclusions bien fondées. Selon l'auteur, le fonctionnement des *p-prims* comporte un système de priorités d'activation (*cueing*, en anglais) et de conservation ou rejet (*reliability*, en anglais). Le premier détermine quelles *p-prims* s'activent dans une certaine situation, le deuxième intervient en cas de contradiction entre observation et prévision ou entre deux *p-prims* différentes, pour établir quelle *p-prim* doit être éliminée. Dans la progression de *naïf* à *novice* à *expert*, il y a une modification du système de priorité et tout le *système de contrôle* du raisonnement devient plus complexe et puissant, le sujet tend à considérer ses *p-prims* comme des représentations commodes, mais approximatives et non explicatives, qu'il peut abandonner pour mettre en œuvre un autre système explicatif plus profond et/ou plus formel. Elles n'ont pas disparues de la pensée de l'expert, mais elles n'y ont qu'un rôle de guide intuitif et heuristique.

L'auteur donne quelques suggestions didactiques pour favoriser l'activation de *p-prims efficaces*. Des *p-prims d'acheminement* peuvent être utiles, qui s'activent spontanément dans la situation en étude, mais qui ont une faible priorité de conservation et donc peuvent être facilement abandonnées par l'élève. Pour surmonter une *p-prim* négative mais résistante, on peut utiliser une *p-prims compétitive*, mais avec une priorité faible. Pour faire activer des *p-prims* à faible priorité mais utiles, on peut proposer des situations inusuelles, dans lesquelles elles devraient émerger facilement et ensuite suggérer leur réinvestissement dans des situations plus normales.

L'auteur juge important connaître le répertoire de *p-prims* des élèves et savoir comment les

manipuler. Parmi les exemples donnés, je cite l'élasticité (*springiness*), la *p-prim de Ohm*, celles de l'extinction graduelle et de la force motrice. Celle dite de Ohm, par exemple, consiste en un schème très général, qui comporte l'idée d'une cause ou un *impetus*, qui rencontre une *résistance* pour provoquer un effet. Elle est active aussi chez l'expert et sans doute l'était chez les savants du passé, comme l'utilisation des mots "tension" et "résistance" dans la loi d'Ohm semble montrer.

Désautels et Larochelle (1992) prônent une *complexification conceptuelle* plutôt qu'un changement conceptuel. Ils pensent que "les conceptions scientifiques et les conceptions spontanées ne sont pas interchangeables, parce qu'elles ne répondent pas aux mêmes questions et ne poursuivent les mêmes finalités Le problème qui se pose alors n'est pas celui de la substitution d'une conception à une autre, mais bien celui de la discrimination des tenants et aboutissants des diverses conceptions" (p.42). Ils critiquent toute stratégie visant à la promotion des conceptions scientifiques au détriment de celles construites par les apprenants, ce qui accorderait aux apprenants le seul rôle de reproducteur des explications trouvées par d'autres et véhiculerait un *schéma de docilité* au savoir établi. "La *complexification conceptuelle* n'implique pas l'élimination des connaissances antérieures ou celles du sens commun, mais plutôt une réorganisation de la structure conceptuelle selon les finalités en cause" (p.67). Ils proposent une stratégie de *dérangement épistémologique* qui permette aux élèves de s'initier aux *jeux de la connaissance*, avec une prise de conscience du statut épistémologique de ses propres connaissances et la reconnaissance et l'intérêt de la possibilité de considérer les règles d'autres connaissances, dont celles du savoir scientifique (p.68-69). Il s'agit de favoriser une forme de métacognition et la relativisation des savoirs. Ils présentent un logiciel de simulation, construit pour activer cette stratégie.

Ils plaident pour un *constructivisme radical* (p.27), qui se fonde sur deux convictions. La première est que le savoir ne peut pas être transmis passivement, mais doit être construit activement par l'apprenant. La seconde est que la cognition doit être vue comme une fonction adaptative qui sert à l'organisation du monde de l'expérience plutôt qu'à la découverte d'une réalité ontologique. Ils définissent comme *constructivisme trivial* la position de ceux qui partagent seulement la première de deux convictions. Ils reprennent ici les idées de Glasersfeld (1988, par exemple), en faisant aussi les analogies de la carte géographique et du territoire ou de la clé et de la serrure, pour illustrer la relation envisagée entre le savoir et la réalité.

Le discours de ces auteurs est intéressant, mais je ne partage pas cette dérive un peu gênante vers une subjectivité poussée jusqu'à nier l'existence d'une "présumée réalité objective". De quoi s'occuperait alors la science ? Et s'il est vrai que pour une serrure on peut faire plusieurs clés différentes, qui marchent toutes bien, il est également vrai qu'il y a des clés qui ne marchent pas du tout, parce qu'elles ne s'adaptent pas à la serrure, qui, tout comme la réalité, fait résistance, et donc elle existe, hors du sujet. Il y a des théories qui sont meilleures que d'autres. Le relativisme radical, tout comme la négation d'une réalité externe, mène toujours à un cul de sac, à une sorte de solipsisme épistémologique.

Un point de vue assez proche de certaines idées guides à la base de notre recherche (cf. chap. 3, par. 3 et 5), a été développé par quelques auteurs (par exemple, Steinberg 1983 et 1987, Sherwood & Chabay 1993, White, Frederiksen et Spohrer 1993, Psillos & Koumaras 1993, Psillos 1995, Gutwill, Frederiksen et Ranney 1996) dans le contexte de l'étude des circuits électriques. Ils proposent d'utiliser la propension spontanée des élèves pour les explications causales comme un levier didactique pour mettre en œuvre un processus d'apprentissage efficace.

Ces auteurs soulignent que les élèves préfèrent les explications causales, qui se déroulent dans le temps et décrivent des changements. Il peut s'agir d'une causalité simple (une cause, un effet), d'un enchaînement linéaire de connexions cause-effet ou d'une causalité circulaire. Le raisonnement systémique, utilisé par le physicien, surtout dans les situations stationnaires, est très loin de l'intuition et de la façon de penser de l'élève ; dans ce cadre, il est difficile pour ce dernier de donner un sens physique aux formules étudiées. Ces auteurs considèrent que les explications causales sont plus satisfaisantes pour les élèves et que leur activation peut favoriser une meilleure compréhension des circuits électriques. Ils proposent d'utiliser, dans les séquences d'enseignement, des situations de changement (dans les cas qu'ils présentent, les transitoires des circuits électriques), plus proches de l'intuition des élèves, avant d'aborder les descriptions stationnaires. Ils pensent en outre que le raisonnement en termes de causalité réciproque et circulaire pourrait être utile comme un pont vers le raisonnement systémique du physicien (voir aussi Halbwachs 1971, pp. 73-76, déjà cité au § 3.5).

Dans ce cadre, Steinberg (1983) propose d'utiliser une analogie entre les phénomènes électriques et la compression et la dilatation de l'air dans un récipient, en activant l'intuition des élèves de l'action de "pousser" (et de "pression"), considérée comme importante pour un raisonnement causal efficace dans les circuits électriques. Il introduit à ce propos l'idée de "pression électrique", comme un modèle pont pour arriver au concept de "potentiel électrique".

Dans le même ordre d'idées, selon Psillos (1995), dans l'étude des circuits électriques en courant continu, "le raisonnement attendu des élèves suppose un point de vue systémique du circuit et il est a-causal, parce que les équations du circuit n'expriment pas une interaction causale entre les grandeurs physiques impliquées, V , I , R . En d'autres mots, les équations du circuit ne représentent pas un procès physique à travers lequel le circuit a atteint son état stationnaire, et ne peuvent être le support d'aucun mécanisme causal", tandis que "le raisonnement des élèves est causal, dans le sens qu'ils cherchent les causes qui peuvent avoir conduit le circuit dans son nouvel état." (pp. 67-68, ma traduction de l'anglais).

2.3 Les séquences d'enseignement sur les fluides

Rollnick et Rutherford (1993), en Afrique du Sud, ont expérimenté une séquence d'enseignement sur la pression de l'air, fondée sur le modèle de changement conceptuel, dans une école primaire du Swaziland (145 élèves concernés, divisés en 4 groupes). L'objectif de leur recherche était double : tester l'efficacité du modèle de changement conceptuel et celle de l'utilisation mixte de l'anglais et de la langue maternelle des élèves (le SiSwati). Ces auteurs ont préparé deux ensembles de matériel didactique, l'un basé sur le modèle de changement conceptuel (CCM), l'autre sur une stratégie classique de découverte guidée (non-CCM). Les ensembles contenaient 18 activités, sur deux semaines d'enseignement. Les objectifs étaient d'intégrer les nouveaux concepts avec des conceptions préexistantes, de remplacer les conceptions spontanées par des conceptions scientifiques, de différencier les concepts mal définis ou confus. Pour l'analyse des idées spontanées, les auteurs se sont servis d'un catalogue des conceptions sur l'air et la pression (*conceptual profile inventory*, CPI), élaboré au cours d'une précédente recherche (Rollnick et Rutherford 1990).

Le sujet était centré autour d'un simple modèle du poumon (une bouteille, fermée par un diaphragme élastique, contenant un petit ballon gonflable relié à l'extérieur moyennant une paille), sur lequel les élèves raisonnaient pour comprendre comment nous respirons. A la fin, les élèves devaient être capables de démontrer que l'air existe, occupe de l'espace, a une masse et exerce une pression, d'expliquer les expériences faites et le fonctionnement d'un

baromètre, et d'utiliser le modèle particulière.

Dans la séquence CCM, le problème de la respiration était utilisé comme *pont* entre les connaissances préexistantes et les nouveaux concepts, et il était au centre de l'apprentissage ; le modèle du poumon était donné aux élèves au début de la séquence, les conceptions alternatives étaient introduites à l'intérieur du matériel didactique et l'enseignant les utilisait explicitement, avec des stratégies d'intégration, d'échange, de différenciation.

Dans la séquence non-CCM, le modèle du poumon était donné à la fin du module, après l'étude des propriétés de l'air ; l'enseignant n'utilisait pas explicitement les conceptions alternatives.

Les résultats, contrôlés avec un système de pre-tests et post-tests, montrent une supériorité significative de la séquence CCM. La séquence CCM a aussi provoqué beaucoup plus de participation à la discussion en classe, ce qui a rendu nécessaire une prolongation de 2 heures de la durée de la séquence.

En Italie, à Pavie, **Borghi L., De Ambrosis A., Falomo L., Mascheretti P.** (1993) ont élaboré et expérimenté, chez 57 étudiants universitaires de première année de physique, une proposition didactique utilisant un environnement multimédia à l'ordinateur pour l'étude de la statique des fluides, centré sur deux expériences historiques originelles de Boyle sur l'élasticité de l'air. Les simulations d'expériences de physique à l'ordinateur visent à établir des liens entre l'observation d'un phénomène et sa description formelle. Les étudiants ont à disposition un environnement d'étude, un "micromonde", en forme d'hypertexte, comportant messages écrits et acoustiques, images, dessins et animations. L'hypertexte donne aussi accès à des ressources d'approfondissement comportant des informations sur les concepts de physique et la réalisation d'autres expériences liées au sujet, sur la présentation du sujet dans les manuels, sur les représentations mentales et les stratégies cognitives, sur le contexte historique, outre d'amples extraits des écrits originaux de Boyle. Les images des dispositifs réels veulent aussi créer une liaison entre les instruments et leur représentation schématique utilisée dans les simulations, liaison pas toujours claire pour les étudiants.

Les auteurs constatent que l'intérêt des étudiants pour les expériences historiques est d'autant plus vif que les simulations provoquent un changement de leur façon de voir la situation physique. Ils observent que ce type de travail mène à une réflexion sur les concepts de base, tels que le poids de l'air, la pression atmosphérique, la transmission et l'équilibre des forces. Ils trouvent que, dans leur travail sur la simulation de la première expérience de Boyle, 70% des étudiants ne prennent pas en compte la pression atmosphérique dans leurs raisonnements ; ce résultat est confirmé par un questionnaire dans lequel une situation analogue avait été proposée (10 réponses correctes sur 57). Les formules évoquées par les étudiants pour surmonter des difficultés ($pV = \text{constante}$, par exemple) font souvent obstacle à leur analyse, les données à disposition n'étant pas exactement celles dont ils sont habituellement fournis.

Dans le cadre de la même expérimentation, le groupe de recherche de Pavie (**Borghi L., De Ambrosis A., Invernizzi C., Mascheretti P.** 1996) a proposé un modèle de liquide permettant d'introduire le concept de pression et d'expliquer le principe de Pascal. Le modèle est présenté en intégrant deux approches : l'une, liée à l'observation et à l'expérimental, utilise des dispositifs simples visant à reproduire des phénomènes typiques de la statique des liquides ; l'autre, fondée sur des animations et des simulations à l'ordinateur, analyse les mêmes phénomènes, en introduisant les éléments conceptuels pour une description formalisée

(par exemple, la représentation avec des vecteurs des forces au sein du liquide et sur les parois).

Le modèle est constitué de petites sphères rigides en contact entre elles sans frottement, considérés comme représentatives des molécules du liquide. Le modèle est introduit graduellement, en partant d'une situation très simple et en introduisant successivement des caractéristiques qui accroissent son pouvoir descriptif. Des situations bidimensionnelles sont étudiées, d'abord avec seulement trois disques rigides, puis avec plusieurs disques rigides (des pions du jeu de dames) posés sur une table et enfermés entre quatre parois, dont l'une peut bouger et une autre fait fonction de piston. On étudie les forces engendrées en poussant sur le piston, en soulignant la différence entre une disposition ordonnée et désordonnée des pions, comme introduction à une isotropie des forces. Cette idée est reprise en utilisant un grand nombre de billes de plomb, environ 2500, comprimées par un piston. En s'appuyant sur diverses animations, on analyse les forces sur les parois et à l'intérieur du "liquide" des billes de plomb. Le concept de pression est introduit comme le paramètre descriptif de l'état de compression en chaque point du liquide, en relation avec les forces étudiées. On se limite au cas où la pression est la même en tout point du liquide.

Le modèle permet de bien montrer comment une action extérieure peut provoquer une distribution de forces isotropes dans toutes les directions. Il ne peut pas rendre compte, évidemment, d'autres propriétés des liquides, telles que la compressibilité et la propagation d'ondes élastiques. Les auteurs proposent, comme suite possible à leur recherche, d'affiner le modèle en remplaçant les disques ou les billes rigides par des disques ou des billes en caoutchouc lisse ou, mieux, avec des anneaux flexibles. Pour rendre compte des interactions attractives (tension superficielle etc.) ou de la cinétique moléculaire, il faudrait au contraire utiliser un modèle complètement différent. L'hypertexte permet d'avoir accès à des parties où l'on voit comment le modèle doit être modifié pour rendre compte du comportement d'autres systèmes, en particulier pour les gaz.

Chomat, Larcher et Méheut, en France, ont expérimenté des séquences d'enseignement pour l'introduction et l'utilisation d'un modèle particulière de gaz au collège.

Dans une première étape (Chomat, Larcher et Méheut 1988, Méheut et Chomat 1990), les auteurs ont fait travailler les élèves (âge de 13-14 ans) à l'interprétation de quelques aspects de transformations physiques de la matière dans le cadre d'un modèle encore très peu sophistiqué. Dans la deuxième étape (Chomat, Larcher et Méheut 1994, Méheut 1996 et 1997), on aborde l'étude des propriétés thermoélastiques des gaz, dans le cadre de référence de la théorie cinétique des gaz parfaits, introduite graduellement et par l'intermédiaire d'un logiciel de simulation.

La première étape a concerné 14 classes 4^{ème}. Après une phase exploratoire et une évaluation par questionnaires des connaissances préalables des élèves sur le sujet, une séquence d'enseignement a été expérimentée, dont l'évaluation a été faite sur la base des fiches de travail des élèves et de questionnaires après enseignement. Le but est de proposer une interprétation unifiée de différents phénomènes sur la base d'un modèle particulière simple. L'insécabilité et l'indéformabilité des particules, posées de façon axiomatique, devraient conduire les élèves à introduire une variabilité des relations entre particules (distances, agitation désordonnée, liberté de déplacement, organisation spatiale) pour rendre compte des variations observées au niveau macroscopique et à construire des relations entre les deux niveaux de description. Les situations proposées concernent la compression d'un gaz, l'air comme mélange de gaz différents, la diffusion gazeuse, l'état solide, la sublimation, l'état

liquide. Cette succession a été choisie pour permettre un enrichissement progressif du modèle. Pour chaque situation les élèves expriment d'abord une description empirique, dont les termes clés sont répertoriés par l'enseignant ; ensuite, ils proposent une représentation iconique des particules pour rendre compte des descriptions empiriques. Quelques représentations, choisies par l'enseignant, sont soumises à discussion avec les élèves. Après ces phases de production et de discussion, il y a la phase d'institutionnalisation, dans laquelle l'enseignant rassemble et reformule les propositions des élèves.

Les auteurs trouvent que, pour décrire la compression des gaz, les élèves évoquent surtout le "tassement", très peu la pression et, dans les représentations, relativement peu d'élèves conservent le nombre des particules. La plupart des élèves ont construit des distances non nulles et variables entre particules, pour rendre compte de la compressibilité des gaz. La moitié d'entre eux ont affirmé que ces distances sont faibles dans les solides, à cause de leur faible compressibilité, deux élèves sur trois considèrent le liquide comme proche du solide sur ce point. Un quart des élèves a introduit le mouvement des particules pour rendre compte de la diffusion d'un gaz. Pour les solides, la moitié des élèves proposent un modèle statique ; ceux qui proposent une certaine agitation des particules le font sans la mettre en relation avec une propriété observable. La majorité des élèves considère le liquide proche du gaz en ce qui concerne l'agitation des particules ; toutefois, un tiers considère que dans le liquide les particules sont peu ou pas agitées, comme dans un solide. Les élèves semblent éprouver une difficulté à imaginer des particules liées mais sans contact. La variation des distances entre particules n'est mobilisée que par la moitié des élèves pour rendre compte de la dilatation des liquides et des solides : dans ces situations, un quart des élèves ne respectent pas l'indéformabilité des particules et attribuent la dilatation aux particules elles-mêmes.

La deuxième expérimentation a comporté cinq entretiens faisant intervenir chacun deux élèves de classe de 5^{ème}, en deux séances de 45 minutes et une séquence d'enseignement de 9 heures, en 6 séances, dans 16 classes de 5^{ème}. L'évaluation utilise les fiches de travail des élèves (9 pour chaque élève) : les fiches de 160 élèves choisis au hasard, 10 par classe, ont été analysées. Deux années après, des informations complémentaires ont été recueillies au moyen de questionnaires auprès d'élèves de 3^{ème} ayant ou non participé à l'expérimentation (107 et 143 élèves respectivement), pour évaluer aussi l'impact à long terme de la séquence.

Cette séquence utilise, comme outils didactiques, un logiciel de simulation et un dispositif matériel simple, de façon à rendre aussi aisée que possible la correspondance entre la simulation et le dispositif réel. Ce dispositif comprend deux seringues, pleines d'air, reliées par un tuyau souple dans lequel une goutte d'eau colorée peut se déplacer.

Le logiciel génère une image de points mobiles se déplaçant dans un cadre rectangulaire, suivant des règles dérivées de la théorie cinétique des gaz. L'utilisateur peut diviser le cadre en deux par une "paroi" mobile, dont les déplacements sont calculés par le logiciel à partir des "chocs" des points sur la paroi.

Les entretiens et la séquence portent sur deux situations : la compression et le chauffage du gaz. L'étude de chaque situation comporte une phase de prévision, d'observation et d'explication, sans faire appel au modèle, et une phase de représentation iconique (petit dessin) et/ou d'utilisation du logiciel pour interpréter les phénomènes avec le modèle particulaire, en termes de position et vitesse des particules, fréquence et "force" des chocs.

L'évaluation à court terme de la séquence a été faite en termes de réinvestissement sur une autre situation un peu différente de celles abordées au cours de l'enseignement (détente ou refroidissement).

Les auteurs trouvent que la majorité des élèves font des prévisions correctes sur le sens du déplacement du dispositif. La majorité utilise le modèle de façon convenable, mais

seulement une petite minorité (13%) considère à la fois la fréquence et la "force" des chocs.

La recherche confirme les deux hypothèses faites sur la base de résultats antérieurs :

H1) les phénomènes faisant intervenir la température posent plus de difficultés aux élèves par rapport à ceux dans lesquels la température n'intervient pas ;

H2) pour prévoir et expliquer un déplacement, les élèves ne prennent en considération que le gaz qui pousse dans le sens du déplacement, alors que les questions sur l'équilibre favorisent la prise en compte des gaz dans les deux seringues.

L'évaluation à long terme montre que les élèves ayant suivi la séquence n'utilisent pas explicitement le modèle dans leur majorité, même s'ils le font plus que les autres, et n'effectuent pas, statistiquement, des prévisions plus justes que des élèves ayant suivi un enseignement différent sur cette partie du programme.

M. G. Séré (1990), à Paris, étudie la progression des élèves à travers trois modèles successifs de la matière: le modèle macroscopique propre aux élèves mêmes, appliqué à des expériences montrant que les gaz exercent des actions, un premier modèle particulier appliqué aux mêmes expériences, et un deuxième modèle particulier appliqué à des réactions chimiques entre gaz et solides. Ce dernier modèle est conçu comme une modification du précédent.

Deux séquences d'enseignement sont mises en œuvre, en dehors du contexte de la classe, pour des groupes de 10 élèves âgés de 11 à 13 ans. Les séquences comportent des manipulations pratiques et des débats. Des entretiens individuels ont été faits avant et après enseignement. Toutes les séances ont été enregistrées.

Le thème de la première séquence (expérimentée avec deux groupes) était l'étude des propriétés des gaz, en particulier les forces exercées par un gaz. Ce thème a été étudié d'abord au niveau macroscopique. Les élèves explicitent leurs propres "modèles" explicatifs, différents les uns des autres, mais possédant aussi des traits communs (par exemple, les explications en termes de mouvements qui causent d'autres mouvements, dans la même direction). Ces modèles fonctionnent assez bien pour des situations comportant de l'air en mouvement, mais ils entrent en difficulté sur des expériences concernant les forces exercées par l'air en situation statique, comme une seringue en position verticale supportant des objets posés sur le piston ou une ventouse. Le conflit cognitif, ainsi engendré, est géré socialement, dans des débats, faisant émerger l'exigence de "quelque chose d'autre". A ce point, l'enseignant donne un texte écrit (dans un cas, avec un logiciel) proposant un modèle particulier, organisé en sept règles ou hypothèses. Le texte utilise un vocabulaire reprenant les expressions utilisées par les élèves dans les débats précédents, offre un modèle visant à répondre aux difficultés des élèves et à interpréter les expériences proposées, précise les invariants (particules identiques, indestructibles et indivisibles) et les relations pouvant changer (position, vitesse), fournit la "connaissance procédurale" nécessaire pour interpréter les expériences. Les acquis communs à tous les élèves, obtenus sur la base du modèle, sont que l'air exerce toujours des forces, même en absence de mouvement macroscopique, et que l'action d'une certaine quantité de gaz dépend de la densité et de la température. Le modèle a du succès lorsque la connaissance procédurale nécessaire est disponible pour l'élève et lorsque le modèle simplifie le raisonnement, en remplaçant plusieurs étapes du raisonnement par une seule. Il arrive qu'un élève n'exploite pas pleinement les acquis de la séquence, parce qu'il ne ressent pas la nécessité du modèle pour ses explications.

Un des deux groupes ayant suivi la première séquence a également suivi la deuxième, un an après. La méthodologie de cette seconde séquence est la même de la première. Après une séance de rappel des éléments du premier modèle particulier, l'enseignant présente une

manipulation permettant de distinguer trois gaz différents A, B, C (O_2 , H_2 , CO_2) selon leur comportement à la flamme et une expérience de combustion de charbon dans le gaz A. Les élèves testent le gaz produit dans la combustion selon le critère de la flamme et observent un comportement comme le gaz C. Les élèves cherchent une explication des observations faites, à l'aide du premier modèle particulière, ce qu'ils n'arrivent pas à faire. Cela engendre un conflit cognitif, géré encore une fois socialement dans le groupe. La différence est que maintenant ce qui est en crise n'est pas leur modèle macroscopique, mais le premier modèle particulière proposé par l'enseignant lui-même. Le silence qui suit le débat marque la perplexité des élèves face à cet échec et l'attente de quelque chose, proposé par l'enseignant. A ce moment, l'enseignant donne un autre texte écrit, sous forme de logiciel, proposant un nouveau modèle particulière, organisé en huit règles ou définitions. Les caractéristiques du texte et ses objectifs sont les mêmes que ceux de la première séquence. Le nouveau modèle prévoit des particules de différentes forme, masse et dimensions, pouvant former des "associations", suivant certaines règles non spécifiées ; dans un choc entre deux de ces associations, il peut arriver que leurs composants se dissocient et forment de nouvelles associations différentes. Les termes "atome", "molécule", "réaction chimique" sont introduit seulement à la dernière phrase du texte. Finalement les élèves répètent les mêmes expériences et d'autres nouvelles, en essayant de les expliquer sur la base du nouveau modèle particulière. Des entretiens individuels ont été faits après enseignement, comportant aussi la réalisation et l'interprétation d'une nouvelle expérience.

La stratégie utilisée dans ces deux séquences consiste à provoquer chez les élèves des *ruptures* cognitives successives, la reconnaissance par le groupe de l'insuffisance d'un modèle étant la condition pour que naisse l'exigence d'une nouvelle connaissance et donc la disponibilité et l'intérêt à accueillir un nouveau modèle. Le caractère social de ce processus semble essentiel.

Le modèle permet aux élèves de décrire la combustion en terme de réaction chimique. Il a une fonction d'*explication*, pour interpréter les observations macroscopiques, et une fonction de *représentation*, qui unifie deux différents champs d'expériences concernant les gaz.

Andersson et Bach (1996), en Suède, expérimentent une séquence d'enseignement sur les propriétés des gaz dans une classe de 22 élèves au 7^{ème} niveau scolaire (âge : 13 ans) ; elle comporte 11 séances.

Les auteurs fondent la conception de leur séquence sur l'analyse des résultats d'une enquête nationale pour évaluer les connaissances scientifiques au niveau 9 (âge : 15 ans) organisée en Suède en 1992. Les auteurs rapportent les résultats de deux des cinq questions de l'enquête, qui concernaient les propriétés des gaz, proposées à un échantillon de N=3103 élèves.

La première de ces questions propose la situation d'une seringue contenant de l'air. On demande ce qui arrive si l'on pousse sur le piston (il est précisé que la distance entre le piston et le fond du cylindre est de 10 cm). Les élèves peuvent choisir parmi 5 réponses possibles. 42% répondent qu'il n'est pas possible de faire avancer le piston (air incompressible), les autres répondent que le piston avancera, soit d'environ un millimètre (33% des élèves), soit d'environ un centimètre (15%), soit de plusieurs centimètres (4%), soit jusqu'au fond du cylindre (4%).

Dans la deuxième question, 73% des élèves répondent que l'odeur d'une peinture fraîche est ressentie dans toutes les directions, mais qu'aucune molécule ne quitte la peinture, 9% pensent que des molécules quittent la peinture et que l'odeur sort de ces molécules. Seulement 16% répondent que des molécules quittent la peinture et lorsqu'elles arrivent dans le nez, on ressent l'odeur.

Les auteurs considèrent ces réponses, et d'autres encore, comme très insatisfaisantes, et se posent le problème de comment améliorer la compréhension des propriétés des gaz, au niveau du collège.

La séquence proposée est élaborée en forme de guide pour l'enseignant, avec une collection de problèmes. Une partie de l'activité de la classe consiste à travailler en petits groupes sur des problèmes. L'étude de l'air est abordée au niveau macroscopique, puis un modèle particulaire est introduit. Plusieurs expériences sont réalisées et débattues dans les quatre premières séances ; dans la suivante, un modèle particulaire est présenté par l'enseignant, en termes de molécules en mouvement, dont la vitesse est liée à la température. Dans les autres séances, la théorie est mise à l'épreuve, dans des problèmes.

Un texte explicatif sur le contenu des séances a été donné aux élèves. Ce texte a été écrit dans un style romanesque, avec deux jeunes personnages, en introduisant aussi des éléments extra-scientifiques, par exemple la relation entre les deux personnages. Avec cette typologie, les auteurs veulent éviter l'effet négatif, de refus, que les textes scolaires engendrent souvent chez les adolescents, à cause de leur style trop austère et impersonnel.

L'évaluation est faite au moyen d'un même questionnaire, comportant 8 problèmes, utilisé comme pre-test et comme post-test, six mois après l'enseignement. Les auteurs visent surtout l'apprentissage à long terme. Les auteurs trouvent que sur six des huit problèmes proposés 18/22 élèves utilisent le modèle au moins une fois, 12/22 au moins trois fois et 5/22 au moins cinq fois. L'utilisation du modèle augmente sensiblement après enseignement. Ces résultats sont considérés comme positifs par les auteurs.

2.4 Conclusions

Les recherches examinées fournissent un cadre de référence important pour les conceptions des élèves sur les fluides.

En ce qui concerne le gaz, les plus jeunes élèves pensent que l'air n'est pas une substance permanente, qu'il n'existe que quand il est en mouvement, comme s'il était créé ou produit par les actions du sujet ou par les autres objets. Pour beaucoup d'élèves de collège, les gaz n'exercent des actions que si l'on exerce une action sur eux ou si on les chauffe. Souvent une pression nulle est attribuée à l'air atmosphérique, dit *normal*. Selon les élèves, les gaz à pression plus grande que la pression atmosphérique "ont une pression" et poussent, tandis que les gaz ayant une pression plus petite que la pression atmosphérique ne peuvent pas pousser, ils agissent plutôt par "suction" ou "aspiration". C'est là l'explication la plus fréquente pour les expériences où il s'agit de boire une boisson avec une paille ou "aspirer" un liquide avec une seringue.

Pour les liquides, la plupart des élèves pensent, correctement, que la pression augmente avec la profondeur, mais plusieurs d'entre eux pensent que la pression dépend aussi de la quantité totale du liquide (elle serait donc plus grande dans un récipient plus large) et qu'elle « agit » seulement vers le bas ou bien plus fortement « vers le bas » que « sur le côté ». Les élèves appliquent souvent aux liquides leur expérience des solides et pensent que le poids "agit" verticalement vers le bas, une idée qui va souvent avec une non-différentiation entre pression et force. Cette idée peut les amener à conclure que la pression dans l'eau augmente, s'il y a un bateau ou un autre objet flottant à la surface, au-dessus du point considéré.

Une autre conception se présente aussi, selon laquelle dans un récipient plus étroit la

pression serait plus grande, parce que les parois compriment l'eau ou que l'eau y est plus concentrée, suivant la conception de la "foule entassée".

L'existence de la poussée d'Archimède est toujours bien connue par les élèves, mais elle est souvent liée, selon les plus jeunes, à la forme et aux dimensions de l'objet et elle est aussi censée augmenter quand l'objet est immergé plus profondément dans l'eau. Chez les plus grands, elle est aussi mise en relation avec la densité et le volume de l'objet, mais rarement avec les deux ensemble. Pour beaucoup d'élèves, elle est une force de réaction du liquide au poids de l'objet immergé.

Les études sur l'utilisation du modèle particulaire microscopique visent principalement les gaz, en se limitant, pour les liquides, à préciser que les particules sont plus proches entre elles que dans les gaz et plus libres que dans les solides.

Les élèves comprennent bien une interprétation de la pression dans les gaz au moyen d'un modèle particulaire, mais en général ils ne prennent en compte que le tassement des particules, une idée d'ailleurs renforcée par les dessins utilisés dans l'enseignement, qui sont nécessairement statiques. Après un enseignement spécifique, le rôle des chocs sur la paroi est en général compris, mais la pression et sa variation avec la température sont liées le plus souvent seulement à la fréquence des chocs, parfois à la force des chocs, très rarement aux deux facteurs ensemble.

Les recherches décrites dans la littérature didactique concernent presque toujours les niveaux scolaires plus bas (primaire et collège, début de lycée) et portent le plus fréquemment les gaz. Notre recherche veut prolonger et compléter ce cadre, en abordant surtout les liquides et les niveaux scolaires plus élevés (lycée et début d'université), avec des questions plus adaptées à ces niveaux.

Parmi les différentes approches et les terminologies utilisées dans la littérature examinée (conceptions, représentations, p-prims, raisonnements), je choisis de mettre au centre de la recherche sur ce sujet les "raisonnements" des apprenants, en cherchant les typologies d'explications et de descriptions des situations physiques et les connexions entre les arguments utilisés par les apprenants.

En ce qui concerne les stratégies d'enseignement et d'apprentissage, je retiens pour notre recherche surtout les idées de conceptions d'ancrage et l'attention qu'accordent certains chercheurs à l'utilisation du raisonnement causal, qu'on a trouvé être préféré et ressenti comme plus "explicatif" et convaincant par les élèves et plus en général par la pensée commune. Ces auteurs concluent qu'il peut être efficace, dans l'apprentissage, de mettre en œuvre un raisonnement causal, en termes d'interactions et de changements, à côté et en appui des explications formelles en termes de permanence, plus fréquentes dans les textes de physique.

Les séquences d'enseignement examinées fournissent des éléments intéressants pour notre recherche. Elles concernent surtout l'introduction du modèle particulaire microscopique, pour décrire et interpréter les phénomènes macroscopiques. Cette relation entre le macroscopique et le microscopique a été beaucoup travaillée par les recherches, principalement pour les gaz.

En effet, il est ardu de donner des explications simples, via la mécanique élémentaire, des phénomènes macroscopiques relatifs aux liquides, en termes de comportement des molécules, l'interprétation microscopique de la pression étant plus complexe que pour les gaz. Dans les gaz, on peut bien négliger, en première approximation, les forces intermoléculaires et se limiter à considérer l'effet de la cinétique, quitte à ajouter, le cas échéant, à un niveau scolaire adapté, les corrections dues aux forces intermoléculaires. Pour les liquides, au contraire, les deux aspects ont le même ordre de grandeur, donc il est indispensable de les considérer ensemble, ce qui complique beaucoup les choses.

La recherche de Borghi et al. est la plus proche de la nôtre. Elle traite, en effet, les liquides via un modèle mécanique simple, faisant référence à des objets de la vie quotidienne, et s'adresse aux étudiants d'université. Elle fournit donc des informations importantes pour notre recherche. La différence est que les éléments constitutifs du modèle envisagé par ces auteurs sont censés représenter les molécules, même si le modèle est statique, et les situations étudiées ne comportent pas la présence de la gravité.

Par contre, notre choix est de proposer un modèle au niveau mésoscopique, pour étudier les situations de statique des fluides en présence de la gravité, en prenant aussi en compte la compressibilité des fluides.

Chapitre 3. QUELQUES IDÉES GUIDES

Raisonnements des apprenants et analyse de contenu

Je vais ici indiquer quelques idées qui seront reprises dans le développement de la recherche, concernant le contenu spécifique en étude (la pression et les fluides) et des aspects plus généraux des raisonnements en physique.

Avant tout, je veux souligner le rôle tout à fait unique que jouent les fluides, les liquides surtout, dans la construction des analogies en physique, sur le plan historique sans doute, mais aussi sur le plan didactique et dans l'imaginaire commun. Il suffit de penser aux analogies hydrauliques dans les circuits électriques, au fluide calorique, aux vortex magnétiques, etc. On peut noter ici une situation un peu bizarre : on fait souvent appel aux fluides comme aide à la compréhension d'autres sujets, mais on les étudie très peu (au moins en lycée) en tant que sujet spécifique. Peut-être à cause de la difficulté et de la complexité mathématique que ce sujet entraîne, dès que l'on va au-delà des exemples les plus banals.

3.1 La pression

Au-delà de l'apparente simplicité et évidence du concept (pression = force/aire, soit $p=F/A$), si l'on étudie la question de plus près on se retrouve embrouillé dans plusieurs doutes et ambiguïtés.

On parle de la pression *exercée sur...* pour décrire l'interaction entre deux objets ou systèmes physiques. Dans ce cas la pression devient une *grandeur d'interaction*.

On parle au contraire de la pression *dans* un fluide ou *du* fluide et alors il s'agit d'une *grandeur d'état*, qui décrit l'état interne du fluide.

Cette double face de la pression est à l'origine de plusieurs malentendus (Besson 1995).

Plusieurs observations suggèrent que la relation $p=F/S$ n'est pas bien utilisable dans beaucoup de situations concernant les fluides. Les élèves qui essaient de l'utiliser sont souvent amenés à des conclusions contradictoires et erronées, car il n'est pas clair pour eux à quelle force et à quelle surface se référer.

La plupart des auteurs insistent sur la nécessité de caractériser la pression comme grandeur d'état d'un fluide, intensive et scalaire, et on recommande de ne pas lui associer un vecteur ou une flèche, dans le but de bien la distinguer des *forces pressantes* ou *forces de pression*, qui sont liées à la pression mais qu'il ne faut pas confondre avec elle (Kariotoglou, Koumaras, Psillos 1993, 1996 et 1999 ; Document d'accompagnement du programme de troisième MEN 1993). On suggère ainsi que la face *interaction*, suspectée de véhiculer l'idée de pression en tant que grandeur vectorielle, devrait être évitée, et avec elle les expressions du type *pression exercée sur* ou *pression vers le bas* ou *vers le haut*. Pour ce type de situations il vaudrait mieux, alors, utiliser d'autres termes, par exemple *densité superficielle de force* (Gié, Sarmant 1988) et une grandeur de type vectoriel.

Mais on voit que ce n'est pas facile : même quelques auteurs cités ci-dessus (tout comme beaucoup d'autres, d'ailleurs) utilisent parfois l'expression suspecte *pression exercée sur*, qui peut favoriser l'idée d'une grandeur vectorielle d'interaction. La tentation est forte, pour tous, car l'usage est ambigu. D'ailleurs, quand on parle de l'*isotropie* de la pression dans les fluides, on suggère qu'elle est *égale dans toutes les directions*, ce qui fait penser qu'elle pourrait changer selon les directions et donc qu'elle a quand même des propriétés directionnelles ; cela

semble en contradiction avec les caractéristiques d'une grandeur scalaire (invariante par rotation des axes du repère).

Ces ambiguïtés dérivent du fait que la pression n'est pas simplement une grandeur scalaire comme d'autres (température, volume, masse volumique, par exemple), elle est un scalaire extrait d'un tenseur. Ce n'est pas par hasard que la question de l'isotropie n'est jamais posée pour la température. Si l'on dit qu'ici, en ce point, la température est 34 °C, personne ne demande "mais en quelle direction ?" ni ne soupçonne qu'elle puisse être différente "vers le haut" ou "vers le bas". De même pour la densité ou la masse volumique. Et, en général, personne ne pose la question pour la masse, même si dans ce cas-là on pourrait bien le faire, étant donné que la masse, dans la loi $F=ma$, relie linéairement deux vecteurs, si bien que l'on pourrait imaginer qu'elle change selon la direction de la force (certains auteurs définissent une masse longitudinale et une masse transversale en dynamique relativiste).

En effet, pour bien définir la pression, il faut se placer dans la théorie des milieux continus. Dans ce cadre, le *tenseur des contraintes* σ , défini par la relation

$$dF = [\sigma]dS, \quad dF_i = \sigma_{ij}dS_j$$

décrit les forces de surface agissant à l'intérieur du milieu. Il s'agit d'un tenseur symétrique du 2^o ordre. Dans le cas d'un fluide au repos, seuls les éléments diagonaux sont non nuls et ils sont tous égaux au même réel, qui représente justement la pression (Landau et Lifchitz 1971, Guyon, Hulin et Petit 1991). Le tenseur devient alors un tenseur isotrope et peut être considéré comme base d'une bonne définition de la pression.

Il est évident qu'au niveau de l'enseignement secondaire et de première année universitaire cette approche plus rigoureuse n'est pas accessible. Les inévitables ambiguïtés qui accompagnent toute autre approche simplifiée doivent être prises en compte dans l'élaboration de projets d'enseignement.

Une autre source d'ambiguïté est la tendance à opérer des *raccourcis conceptuels*, en identifiant des grandeurs liées par une équation, identification qu'on étend aussi aux significations physiques des mêmes grandeurs.

On a tendance, par exemple, à considérer la loi de l'hydrostatique ($\Delta p = -\rho g \Delta h$ ou $\text{grad} p = \rho g$) comme une *définition* de la pression hydrostatique, tandis qu'elle représente une *relation d'équilibre* entre deux interactions bien distinctes : les interactions superficielles, agissant entre les parties du fluide, et les forces de volume du champ extérieur de la gravité.

Il en est de même avec la relation $F_n = p \cdot A$ entre la pression du fluide (ou dans le fluide) et l'intensité de la force exercée par le fluide sur une paroi solide. Elle devrait être considérée comme une relation entre deux grandeurs différentes, et non comme une définition de la pression : la force F représente une interaction entre le fluide et la paroi solide, tandis que la pression p représente une interaction entre les parties du fluide.

3.2 Poids action et poids quantité

On a déjà remarqué (Piaget 1971) la double nature de l'usage et du sens du mot *poids* et de ses dérivations : le *poids quantité* et le *poids action*.

Selon Dupré (1986) "pour le sens commun le poids n'est pas une force ... le poids serait un attribut des corps, plus ou moins équivalent à la masse, qui aurait, parmi ses propriétés, celle d'exercer une force."

On a beau dire que le poids d'un objet est la force exercée par la Terre sur l'objet, dans le sens commun il est plutôt une propriété intrinsèque de l'objet et, de plus, une propriété *active*, une *vertu* que l'objet peut exercer sur d'autres objets.

Dans l'usage courant, même figuré, il semble évident que le poids est souvent considéré comme une action exercée par l'objet qui pèse, et non comme une action de la Terre sur lui ; et ce poids est censé pouvoir se transmettre, totalement ou partiellement, aux objets proches, au-dessous. Le dictionnaire Hachette écrit : "*Peser sur* : exercer une force, une pression sur. *Cela a pesé sur ma décision. L'oisiveté lui pèse* ». D'ailleurs l'étymologie du mot est la même que celle de *pendre*, du latin "pendere".

Le langage des manuels et des enseignants peut aussi favoriser cette idée. On trouve souvent des expressions du type "prenons un poids", "on attache un poids à...".

On reviendra par la suite sur cet aspect et son influence sur les conceptions relatives aux fluides et à la pression en présence de la gravité (paragraphe 5.3).

D'ailleurs, la classique expérience du tonneau de Pascal² est considérée comme une démonstration spectaculaire d'un effet plus général, souvent évoqué dans la littérature comme le *paradoxe hydrostatique* (Psillos et Kariotoglou 1999, Resnick, Halliday et Krane 2001, p. 344, et la plupart des textes italiens de physique consultés). Cette dénomination regroupe deux effets typiques des liquides : le fait que les forces exercées par le liquide sur le fond de deux récipients, contenant la même quantité du même liquide, peuvent être très différentes entre elles selon la forme des récipients ou, à l'inverse, le fait que les forces exercées par le liquide sur le fond de deux récipients, contenant quantités différentes du même liquide, peuvent aussi être égales, si la forme est différente.

Ces faits sont perçus comme paradoxaux justement parce qu'on pense que le liquide devrait transmettre, devrait "exercer" son poids sur les objets au-dessous, et on s'émerveille donc qu'un liquide puisse exercer une force supérieure à son poids ou que deux quantités de liquide, ayant un poids différent, puissent exercer la même force.

D'ailleurs, les formulations usuelles de la loi de l'hydrostatique (loi de Stevin), en termes de poids de la colonne de fluide au-dessus, peuvent donner une image impropre de la situation physique et favoriser cette idée d'action ou transmission du poids au-dessous.

² Je cite du texte de physique de Gié et Sarmant (1985), p.65 : "Le tonneau totalement rempli d'eau est surmonté d'un tube de hauteur suffisante et dont le diamètre n'importe pas (on peut donc utiliser un tube de faible diamètre). Si on remplit d'eau le tube sur une hauteur h suffisante, on constate que le tonneau éclate. Ainsi, un volume, même très faible, de liquide ajouté peut faire éclater un tonneau même de grande taille. L'explication du phénomène découle immédiatement du théorème de Pascal. On augmente de la sorte en tous les points du liquide la pression d'une même quantité $\Delta p = \mu gh$. Comme la pression extérieure reste égale à la pression atmosphérique, on crée en tout point de la paroi du tonneau une même surpression génératrice de forces dirigées vers l'extérieur." Ainsi pour $h=5$ m, $\mu=10^3$ kg/m³, sur une surface de 1 dm² on obtient une force supplémentaire d'environ 500 N, "c'est-à-dire l'équivalent du poids d'une masse de 50 kg ! Si la section du tube a une aire de 1 cm², la masse d'eau ajoutée n'est que 0,5 kg. Ces chiffres expliquent le côté spectaculaire et a priori surprenant de l'expérience."

3.3 Cause efficiente et cause contingente

Dans le raisonnement commun, on fait souvent confusion entre deux aspects différents de l'explication physique, que j'appellerai *cause efficiente* et *cause contingente*.

On tient un objet dans la main, on ouvre la main et l'objet tombe : quelle est la cause de la chute de l'objet, l'ouverture de la main ou la force de gravité de la Terre ? On pourrait répondre : toutes les deux, il n'y a pas *la* cause, il y a *les* causes, mais on peut pas se passer de prendre en compte la nature différente des deux causes envisagées. L'ouverture de la main permet à l'effet de la force de gravité de se manifester en tant qu'accélération vers le bas, mais c'est cette force de gravité qui fait tomber l'objet vers le bas. Cela revient à peu près à la différence de sens entre les verbes "provoquer" et "produire".

D'ailleurs, un accusé aurait beau dire que la vraie cause de la mort de la victime n'est pas lui, qui l'a seulement poussée hors de la fenêtre, mais la gravité, qui l'a fait tomber, les juges n'hésiteraient pas à le condamner. Ce qui montre que, dans la vie quotidienne, celle qui est prise en compte le plus souvent est la cause contingente, qui provoque ou permet l'activation de la cause efficiente, enlève les contraintes ou joue le rôle de déclencheur. En effet, avec l'interrogation "pourquoi", dans la vie quotidienne, le plus souvent on ne cherche pas les "causes", mais plutôt les "raisons", le sens, les buts ou les responsabilités. On peut bien se douter alors que dans la pensée commune on a tendance à se concentrer sur la cause contingente et à l'identifier à la cause efficiente.

En d'autres mots, il s'agit de la distinction faite par Halbwachs (1971) entre les "*conditions* de production du phénomène" (cit. p.26) et la cause "vraie", qui produit le phénomène.

Halbwachs (cit. p.25) utilise l'exemple de l'expérience d'Oersted, avec une pile de Volta, un fil enroulé en boudin, un interrupteur, et une aiguille aimantée. "Si on ferme l'interrupteur, l'aiguille est aussitôt déviée ... quelle est la *cause* de la déviation de l'aiguille ?" On pourrait répondre que la cause est la fermeture de l'interrupteur, mais "on voit que c'est là une réponse tout à fait superficielle ... Il est bien clair que la fermeture de l'interrupteur ne fait ici que fermer le circuit, c'est-à-dire compléter toute une situation qui est nécessaire *dans son ensemble* à la production du phénomène. ... Nous nous apercevons alors que nous avons glissé du problème de la cause à la considération plus générale des *conditions* de production du phénomène." D'un point de vue mathématique, ces dernières correspondent aux conditions initiales ou aux "conditions aux limites" d'une équation différentielle décrivant le phénomène.

Une distinction, qui ressemble à la précédente, se retrouve dans l'analyse que fait Ogborn (1985, p.36) des "structures naïves de base de la compréhension des causes du mouvement". Cette analyse est centrée "sur la description de deux caractéristiques essentielles des causes du mouvement, à savoir "l'effort" et le "support". Ainsi "tomber" peut être décrit comme la conséquence d'une absence de support (qui empêche la chute) qui est la cause de ce qui se produit." Ici, l'absence de support correspond à une *cause contingente*, à une *condition* de la chute.

Dans le cas des fluides dans le champ de gravité, la situation est plus compliquée et un peu différente, mais le problème logique est le même. Comment expliquer la variation de pression avec la profondeur ou l'altitude ? Quelle est la cause de cette variation ? La force de gravité, le poids, provoquent l'augmentation des forces de pression, mais ce sont les interactions entre les parties du fluide qui sont en relation directe avec la pression, et ce sont les interactions entre les parties du fluide et les parois solides qui "produisent" les forces de pression, ces dernières n'étant que les résultantes au niveau macroscopique de ces interactions.

Le récipient, les parois solides sont le "support" qui empêche la chute du fluide et ils ont

donc le rôle de "conditions aux limites", de cause contingente.

Mais ici la gravité est aussi, en quelque sorte, une cause contingente, une condition pour que la variation de pression se produise, tandis que ce sont les interactions locales, superficielles, qui produisent cette variation et constituent, donc, la cause efficiente.

Nous avons observé, au contraire, que l'insistance, presque exclusive, sur le rôle du poids du fluide comme *cause* de la pression hydrostatique peut engendrer l'idée que la force de pression du liquide et dans le liquide est non seulement due au poids, qu'elle est égale au poids, mais qu'elle *est le poids*, c'est-à-dire une force de nature gravitationnelle (cf. par.5.4).

Un problème similaire se présente aussi avec les solides. Si l'on pose un livre sur une table et l'on demande quelles sont les forces agissant sur la table, s'ajoutant aux précédentes, plusieurs élèves répondent que c'est le poids du livre. Le *regard global* se concentre sur le poids, comme action et comme quantité, et les interactions au contact entre le livre et la table sont oubliées. Lors d'un court entretien, un élève (niveau terminale) a répondu à cette question en évoquant, parmi les forces agissant sur la table, la force due à la pression de l'air, les forces du sol, le poids de la table et, enfin, aussi le poids du livre. Sollicité à être plus précis sur l'origine et la nature de cette force, il a fourni d'autres détails, variant beaucoup en cours d'entretien, par exemple : *"C'est une force de l'attraction de la Terre ... elle est comme la gravité, elle est la gravité ... elle est exercée par le livre, non, par la Terre, par tous les deux ... S'il n'y avait pas la gravité, le livre n'exercerait aucune force sur la table, donc c'est la Terre qui exerce cette force sur la table, en effet sur la Lune cette force serait plus petite. ... Mais non, ce n'est pas la Terre, mais la force dépend de la Terre, donc, de façon indirecte ... La Terre exerce une force sur le livre, donc de façon indirecte, aussi sur la table ..."*

On voit bien toute la difficulté de cet élève et la confusion dans laquelle il est plongé, même s'il montre qu'il connaît les bases de la physique étudiée (par exemple, à un certain moment il a aussi évoqué la force d'attraction gravitationnelle entre le livre et la table, mais il a rapidement convenu qu'elle pouvait être négligée dans ce problème).

La présence du poids, très lié à l'expérience vécue de tout le monde, semble être un fort facteur de trouble, qui change la perception de la situation physique et focalise l'attention, en faisant oublier ou en mettant en seconde ligne d'autres aspects.

3.4 Le niveau mésoscopique

Dans les paragraphes précédents nous avons illustré certains problèmes d'interprétation de situations physiques simples, liés à la prédominance d'un *regard global* et à une focalisation excessive sur le rôle du poids. Pour aller au-delà de ces raisonnements un peu simplistes, il est nécessaire de porter l'attention de l'apprenant sur les interactions de contact, par exemple entre un livre et une table, ou entre un liquide et les parois du récipient ou d'un objet solide immergé. Ce changement d'éclairage, pour être efficace et devenir opératoire, comme une nouvelle et plus puissante source d'explication, demande d'activer une analyse locale, en petit, des interactions et des effets. L'exigence est alors posée de passer à un niveau de description différent, le système macroscopique devenant ainsi le résultat d'un grand nombre d'éléments beaucoup plus petits.

Cette procédure est typique de la physique ; Halbwachs (1971) y fait référence en la posant dans la troisième de ses catégories d'explications en physique, l'explication "bathygène" (cit.

p.46), les autres deux étant l'explication homogène ou formelle³ et l'explication hétérogène ou causale. Elle est aussi un schème d'explication qui apparaît naturellement chez les enfants, selon les recherches de Piaget. Un exemple est celui d'un morceau de sucre qui se dissout dans l'eau et semble disparaître : pour expliquer la conservation du sucre, plusieurs enfants disent qu'il s'est divisé en fragments, miettes, graines, particules de plus en plus petits, qui deviennent invisibles, mais qui expliquent la persistance de la saveur douce (cette expérience est illustrée dans Piaget et Inhelder 1962, chapitres 5 et 6).

Ce changement d'échelle pourrait bien sûr nous amener au niveau microscopique des molécules et des atomes. Mais la description deviendrait nécessairement beaucoup plus complexe, et la connexion avec le niveau macroscopique demanderait la maîtrise de théorisations difficiles, tout en demeurant problématique. Les éléments composants de ce niveau ont des propriétés et des comportements différents des objets macroscopiques et il est bien connu (Lijnse et al. 1990) que les élèves ont une tendance spontanée à attribuer à ces éléments les mêmes propriétés des corps macroscopiques.

Un niveau intermédiaire, mésoscopique, permet, au contraire, d'activer un raisonnement local, en divisant par la pensée le système matériel en petites parties en interaction, sans s'impliquer dans les difficultés engendrées par le niveau microscopique.

En effet, les éléments constitutifs de la fragmentation mésoscopique peuvent garder les propriétés fondamentales des objets macroscopiques et donc être traités comme étant des petits morceaux, des petits objets, ayant une température, une densité, une élasticité et pouvant agir l'un sur l'autre par contact, même en situation statique. Surtout, pour se faire une "image" de leur comportement⁴ on peut faire appel à l'intuition dérivée de l'expérience ordinaire avec les objets de la vie quotidienne, chose qui serait impossible avec des molécules.

Il est évident que l'usage du modèle particulière microscopique est incontournable pour une compréhension profonde de la physique et pour traiter de façon unifiée différentes phénoménologies, outre qu'il est important par lui-même, comme un acquis central de la science.

Néanmoins une analyse au niveau mésoscopique peut être très fructueuse, comme étape didactique intermédiaire ou comme outil de représentation et d'explication simple de plusieurs situations. Elle est d'ailleurs d'utilisation classique et usuelle dans la mécanique des milieux continus et des fluides, comme l'on voit dans les citations suivantes, tirées du texte de Guyon, Hulin et Petit (1991).

"En mécanique des milieux continus, on est amené à définir des grandeurs macroscopiques : pression, température, vitesse, masse volumique. Ces quantités sont des moyennes des grandeurs microscopiques correspondantes sur une taille grande devant l'échelle de leurs fluctuations microscopiques, mais petite devant celle des variations à l'échelle macroscopique, due à l'hétérogénéité du milieu. Le volume sur lequel est réalisée la moyenne est appelé volume élémentaire représentatif." (p.31)

"On définit une *particule* de fluide comme un élément de fluide de Volume V tel que sa taille $a \approx V^{1/3}$ soit :

³ Il est intéressant pour nous que Halbwachs prenne comme exemple d'explication homogène ou formelle la loi de l'hydrostatique (cit. p.44).

⁴ Cette possibilité est très importante pour la compréhension des apprenants. De Kleer et Brown (1983), cités aussi par Ogborn (1993), indiquent la représentation du système et l'imagination ("envisioning" en anglais) de ses fonctionnements possibles parmi les étapes du processus de compréhension d'un système physique.

- très petite devant les échelles de longueur caractéristiques L de l'écoulement (largeur d'un canal, rayon d'un tube, taille d'un obstacle...);
- très grande devant le libre parcours moyen l des molécules.

...

Remarque : Il faut se garder de confondre la particule de fluide avec la molécule (ou l'atome) constituant le fluide ; une particule de fluide contiendra toujours, d'après ce qui précède, un très grand nombre de molécules." (pp.97-98)

D'un point de vue didactique, une approche mésoscopique nous semble un outil efficace et essentiel pour atteindre l'objectif de déplacer le regard de l'élève vers les interactions locales et construire une compréhension plus articulée et complète, au-delà des explications simplistes dominées par l'idée de l'action du poids.

Par exemple, cette approche est fondamentale pour que l'élève puisse se convaincre de la connexion entre la poussée d'Archimède et les forces de pression exercées par le liquide sur l'objet immergé. Elle est aussi incontournable dans l'étude du frottement entre solides.

Il faut préciser qu'un découpage mésoscopique, comme celui esquissé plus haut, a le mérite de la simplicité et de l'efficacité didactique, mais ne constitue pas vraiment une explication en termes de niveau différent de la réalité. Les éléments mésoscopiques ayant, en gros, les mêmes caractéristiques que les éléments macroscopiques, il ne s'agit pas d'expliquer un aspect du réel avec d'autres aspects plus profonds et fondamentaux, comme ce serait le cas avec le niveau moléculaire et atomique ⁵. Ce qu'on fait est seulement un découpage spatial, une analyse plus localisée, qui favorise la construction d'un raisonnement systémique, en connectant le local et le global par l'intégration et la transmission des actions et des effets locaux. Les lois et les règles de base restent les mêmes aux deux niveaux envisagés. Suivant les catégories déjà citées de Halbwachs, on n'est pas entièrement dans une explication bathyène, mais plutôt dans un cas intermédiaire entre la bathyène et la causale.

La recherche didactique a négligé jusqu'à présent l'utilisation et l'étude d'une approche mésoscopique, tout comme les programmes officiels de lycée et de collège. L'accent a été mis sur le passage macro-micro, sur l'acquisition du modèle particulaire moléculaire, sur les explications en termes microscopiques et cinétiques des propriétés et des phénomènes macroscopiques.

Le niveau mésoscopique est, au contraire, au centre de notre séquence didactique sur la statique des fluides.

3.5 Temps et causalité, régimes permanents et transitoires

On a bien démontré (Rozier 1988, Viennot 1993) qu'il existe une difficulté majeure dans la compréhension des régimes permanents. Le physicien parle dans ce cas de phénomènes *stationnaires*, de *transformations quasi-statiques*, où le temps est absent, tandis que la pensée commune préfère raisonner en termes de transformations transitoires, d'enchaînements d'événements qui se succèdent dans le temps, comme dans une histoire ou un récit.

C'est le *raisonnement linéaire causal*, mis en évidence par Rozier (1988), qui conduit

⁵ On pourrait dire que les éléments mésoscopiques ressemblent, plutôt qu'aux atomes de Démocrite, aux "homéoméries" de Anaxagore, selon lequel les corps sont composés de petites parties similaires : les os, d'os extrêmement petits, les chairs, de chairs extrêmement petites, etc.

les élèves vers plusieurs difficultés et erreurs.

Mais une fois bien compris le cul de sac où vont mener certaines tendances du raisonnement commun, par exemple la considération d'une seule variable à la fois et l'approche non systémique basée sur la chaîne linéaire *une cause, un effet*, il est également licite de porter un regard plus critique sur l'attitude du physicien et de se demander si une cause de difficulté ne pourrait être aussi le caractère *très artificiel* du raisonnement physicien.

En effet, où sont les régimes permanents et stationnaires dans la réalité, et comment peut-on s'imaginer une *transformation statique*, expression en soi auto-contradictoire, même si elle est corrigée avec un plus sage *quasi* ? Jusqu'à quel point peut-on se passer de ce *quasi* et qu'est-ce qui se cache derrière lui ? Bien sûr, dans les calculs cela fonctionne, le *quasi* peut être (doit être) négligé, mais bien calculer n'est pas toujours bien comprendre.

Purifié de ses défauts et ingénuités, l'essentiel du raisonnement commun, fondé sur le transitoire et le devenir semble parfois plus proche de la réalité physique que l'image immobile et figée, supposée dans certains cas par le physicien. Ce contournement du changement, du temps, du transitoire, une sorte de quête de l'éternité et expulsion du devenir, peut apparaître comme une négation perverse de la réalité, qui peut contribuer à donner au profane l'impression que cette science ne concerne pas vraiment le monde et la vie réels, mais seulement un univers mécanique, étrange et hostile.

On peut trouver ces considérations éloignées du sujet, mais la nécessité de reconstruire le contenu pour l'adapter à l'enseignement demande aussi de réfléchir sur les fondements conceptuels et les idées plus générales, sur l'esprit et le sens des connaissances qu'on veut faire apprendre ; et si l'on veut se raccorder, en quelque sorte, avec la pensée commune et son image du monde, peut-être faut-il essayer d'"expliquer le changement sans le nier, sans le ramener à l'enchaînement du même au même" (Prigogine et Stengers 1988, p.45).

D'autres auteurs (par exemple, Psillos & Koumaras 1993, Psillos 1995, Gutwill, Frederiksen et Ranney 1996, Sherwood & Chabay 1993) soulignent, comme nous l'avons fait ici, que les élèves préfèrent les explications de type causal, qui se déroulent dans le temps et décrivent des changements. Ils proposent des démarches d'enseignement dans lesquelles les élèves sont sollicités à activer des raisonnements en termes de causalité (d'abord causalité simple ou linéaire, ensuite causalité circulaire), comme une première étape vers l'acquisition du raisonnement systémique du physicien. Ils proposent d'utiliser des situations de changement, par exemple les transitoires des circuits électriques, considérées plus proches de l'intuition des élèves, avant d'aborder les descriptions stationnaires.

D'ailleurs, Halbwachs (1971) avait déjà remarqué que "la causalité réversible constitue un certain *degré* de la connaissance au plan épistémique. Ce degré paraît être *une étape intermédiaire nécessaire dans le mouvement qui conduit de l'explication causale simple, qui est une explication hétérogène, à l'explication formelle ou homogène.*" (p.73, italiques de l'auteur). Dans la suite, Halbwachs montre comment le passage de la causalité simple à la causalité réciproque et circulaire prépare la formation de relations non causales, de lois homogènes. "Nous sommes donc passés à une forme *d'explication homogène*, qui nous fournit une loi de correspondance, mais dont on ne peut que dire «c'est ainsi» ... Cependant de telles lois continueront à garder une valeur explicative puissante, à titre de résidu des causalités simples, puis de la causalité réciproque, qui ont conduit à la formulation homogène, mais qui lui restent sous-jacentes" (p.76).

3.6 Articulation entre différents raisonnements

3.6.1 La loi de l'hydrostatique

La loi de l'hydrostatique nous dit que la pression dans un liquide augmente avec la profondeur. Pour expliquer cela on fait appel au poids du liquide au-dessus, et pour connaître la pression en un point il faut prendre en considération toute la hauteur du liquide jusqu'à la surface de contact avec l'atmosphère. Il s'agit d'un *raisonnement global*, en grand. La pression en un point est mise en relation avec ce qui se passe dans les parties très éloignées du liquide.

Mais on peut se demander en quoi le liquide en bas est différent du liquide en haut pour qu'il y ait une pression plus grande. Si rien ne change (température, densité, composition), cette différence devient un mystère. On pourrait dire que le liquide en un point ne sait pas ce qui se passe loin de lui. D'ailleurs, si l'on enferme à Paris de l'air dans un récipient avec un manomètre et qu'ensuite on transporte le récipient en montagne, le manomètre indiquera encore la pression de Paris. Ce qui montre que, à part le poids et la hauteur de toute l'atmosphère, c'est l'air qui est là, à Paris, qui a cette pression et ces caractéristiques, différentes de celles de l'air en montagne. Mais si on accepte facilement que l'air de Paris ne soit pas comme l'air de montagne, pollution à part, il faut aussi accepter que l'eau en bas du récipient diffère en quelque propriété de l'eau en haut.

Voilà qu'il faut faire appel à un *raisonnement local*, en petit. C'est alors que redevient utile l'idée que la pression est liée à la densité. Parce qu'en effet, à température constante, c'est justement la différence de densité qui peut rendre compte de la différence de pression.

Il ne suffit pas de dire que, pour qu'il y ait équilibre, la pression *doit* être plus grande en bas, il faut aussi s'imaginer *comment cela peut arriver*, quelles modifications interviennent pour que le liquide puisse avoir une plus grande pression. Encore une fois, calculer ne suffit pas à comprendre.

Il faut préciser qu'un problème pareil existe aussi pour les solides. La schématisation du *corps rigide* marche bien pour calculer la force qu'une boîte exerce sur une table, mais l'origine de cette force demeure mystérieuse si l'on ne considère pas les déformations de la boîte et de la table. C'est seulement l'augmentation de ces déformations qui peut expliquer le fait que la force augmente si on ajoute une autre boîte sur la première. Donc le modèle du corps rigide permet de calculer ces forces mais ne permet pas de les comprendre.

Cette articulation entre les raisonnements des élèves renvoie au problème des différents modèles qu'on utilise en physique sur le même sujet, et à celui du passage d'un modèle à l'autre, par exemple d'un modèle macroscopique à un modèle particulière microscopique (cf. Séré 1990).

Dans notre séquence d'enseignement, il s'agit de passer à un niveau mésoscopique, pour expliquer les propriétés macroscopiques au moyen des interactions entre les éléments mésoscopiques du modèle proposé.

3.6.2 La poussée d'Archimède

Presque tous les élèves connaissent la règle de la poussée d'Archimède. Mais que comprennent-ils vraiment de cette règle ? Quelles est l'origine de cette force ? Quelle relation envisagent-ils entre la formulation globale, qu'ils récitent bien, et les différences de pression dans le fluide ? On a vu que, très souvent, cette relation n'est pas du tout considérée (Pisani 1982). Il est donc important de bien étudier la connexion entre la formulation globale et la description de ce qui se passe localement dans les parties du fluide en contact avec le corps immergé. La célèbre formule d'Archimède est une formule intégrale, qui renvoie à la globalité du corps immergé et qui cache son origine, liée aux variations de pression avec la profondeur. C'est pour cela que plusieurs élèves ne savent pas indiquer l'origine de cette force et en viennent souvent à l'interpréter comme une nouvelle force autonome.

3.7 Le rôle des conceptions des apprenants

Selon les théories sur le *changement conceptuel* (Posner et al. 1982, Hewson 1982, Hewson & Thorley 1989), dans certains cas, l'acquisition d'une conception scientifique demande une véritable *révolution conceptuelle*, comparable aux révolutions scientifiques de l'histoire de la science. En termes de la théorie piagétienne, il s'agit d'un processus d'*accommodation*, plutôt que de simple *assimilation*.

Pour qu'il y ait ce changement conceptuel, il ne suffit pas de créer un *conflit cognitif* entre les conceptions de l'élève et quelques expériences; on trouve en effet que souvent les élèves mettent en doute leur conception, mais n'assument pas la nouvelle conception scientifique proposée. Pour que cela puisse arriver, il faut que certaines conditions soient satisfaites et que les caractéristiques de l'*écologie conceptuelle* du sujet soient favorables.

Les conditions nécessaires sont l'*insatisfaction* à l'égard des conceptions habituelles, l'*intelligibilité* de la nouvelle conception, sa *plausibilité*, du moins comme hypothèse initiale, sa *fécondité*, pour résoudre des difficultés antérieures, intégrer les aspects positifs de la vieille conception, ouvrir de nouvelles possibilités.

Mais les conceptions des élèves ne sont pas toutes mauvaises, il y en a qui constituent de bons points d'ancrage, *anchoring conceptions*, selon Clement et Brown (1989), ou *bridging analogies* (Driver 1989), pour bâtir une conception plus efficace et plus proche de celle qui est scientifiquement acceptée.

Une idée similaire est proposée par diSessa (1982), même si c'est dans un autre contexte de référence, celui des primitives phénoménologiques, p-prims en abrégé, structures explicatives élémentaires et primitives, construites par abstraction et généralisation d'observations de la vie courante. Il propose de favoriser l'activation de p-prims *efficaces*, qui peuvent plus facilement conduire vers une bonne physique, celle de l'expert. D'ailleurs, selon cet auteur, les idées spontanées ne sont pas complètement abandonnées par le physicien expert, elles sont mises à part et parfois utilisées comme une aide heuristique intuitive, dans une phase préliminaire de recherche.

Notre hypothèse est que les conceptions des élèves ne sont pas seulement à surpasser, à mettre en crise, à effacer, pour les remplacer par une nouvelle conception, mais qu'elles constituent aussi le matériel disponible qu'on peut utiliser pour construire une structure conceptuelle plus complexe et puissante.

Je pourrais paraphraser la règle de Bacon, "natura non nisi parendo vincitur", en remplaçant "natura" par la pensée de l'élève. C'est justement en utilisant les forces de raisonnement existantes de l'élève, dans une dynamique positive de développement conceptuel, qu'on peut favoriser un changement.

En ce qui concerne le sujet spécifique de cette recherche, je propose comme *conceptions d'ancrage* trois raisonnements communs très répandus, que je vais présenter par ordre de généralité croissante.

Le premier est l'idée qu'à température constante, si l'on fait diminuer le volume d'un fluide, sa pression augmente, et que, vice-versa, si l'on pousse plus fort, le volume va diminuer ; alors que, si la pression diminue, le volume augmente.

A température constante, moins de volume implique plus de pression, les deux choses étant souvent considérées équivalentes : c'est l'idée de pression comme tassement, dont on a déjà parlé. Plusieurs auteurs (Séré 1985a, Chomat et al. 1992) s'accordent sur le fait que les élèves de collège "disposent de raisonnements suffisants pour prévoir le sens d'évolution des systèmes dans le cas de la compression" à température constante et ils "sont en mesure de prévoir les propriétés des gaz liées à une variation de volume" (Méheut 1996 p.21 et p.27-28). D'ailleurs le mot même de *compression* indique couramment une diminution de volume et *comprimer* signifie "agir sur un corps par la pression pour en diminuer le volume" (Dictionnaire du français, Hachette 1989, p.336).

Le deuxième veut qu'à cause du poids ou de la gravité, les corps au-dessus *écrasent* ceux au-dessous, ce qui entraîne une *déformation* dans les solides et une *compression* dans les gaz et peut-être aussi dans les liquides. L'utilisation de cette idée est risquée, parce qu'elle entraîne souvent des conceptions fausses assez résistantes (par exemple, que la pression dans les fluides agit seulement verticalement vers le bas), mais elle est aussi très puissante et répandue. Une idée du même type est celle selon laquelle un fluide en mouvement, ralenti et arrêté contre un obstacle, est écrasé, comprimé, dans la direction de son mouvement initial (dans les bandes dessinées, même les personnes et les voitures sont comprimés lors d'un freinage violent).

Le troisième raisonnement, plus général, consiste à se focaliser sur les causes et les effets qui s'enchaînent et se propagent plutôt que sur des lois formelles, sur les changements plutôt que sur la permanence, dans une sorte d'histoire qui se déroule dans le temps (Viennot 1996).

Cette troisième conception est importante dans plusieurs situations statiques et dynamiques, mais surtout dans l'étude des régimes permanents, des situations stationnaires.

Elle pose l'exigence d'expliquer comment la situation d'équilibre ou stationnaire *se constitue* et comment elle *se maintient*. Cette double explication, concernant *la formation et le maintien* d'un état physique, est envisagée de façon différente par la pensée commune (ou l'élève) et par le physicien (ou l'enseignant) : l'élève s'intéresse davantage au problème de la formation, de la genèse de la situation, alors que le physicien se focalise sur les conditions et les modalités du maintien de l'état stationnaire. Le premier raisonne surtout en termes de changement, le second en termes d'équilibre. Le premier décrit des changements envisageant des mécanismes qui s'enchaînent dans une explication causale linéaire, tandis que le second considère plutôt des relations entre des grandeurs physiques valables à un instant donné, en évacuant le temps de son discours.

L'hypothèse qui a guidé notre recherche est que la prise en compte de ces tendances communes du raisonnement de l'élève et leur utilisation explicite, sous certaines conditions et avec des modalités opportunes, peuvent aider à canaliser l'apprentissage vers un changement conceptuel stable, qui permette de faire coopérer efficacement le formalisme du physicien et les exigences intuitives de la pensée commune.

Les trois *conceptions d'ancrage* décrites ici seront prises en compte et utilisées lors de l'élaboration et l'expérimentation de la séquence d'enseignement, qui feront l'objet des chapitres 6, 7, et 8. La séquence ne comportant que des situations statiques, un seul aspect de la troisième de ces conceptions sera utilisé, celui concernant la préférence de la pensée commune pour les explications causales, pour l'enchaînement de causes et d'effets.

Par exemple, pour expliquer le fait que la pression dans un récipient plein d'eau augmente avec la profondeur, on peut raisonner en deux phases distinctes.

Dans une première phase, on fait l'hypothèse qu'il n'y a pas de gravité. Alors la pression est égale partout dans le liquide ; d'ailleurs, il n'y a pas de sens à parler de haut et de bas en absence de gravité.

On imagine ensuite de faire apparaître la gravité. Qu'est-ce qu'il arrive à l'eau ? Quels changements se produisent ? L'eau tend à tomber vers le bas. Si elle tombe librement, rien ne change dans l'eau, la pression demeure égale partout. Mais si le récipient est tenu immobile, alors l'eau s'écrase vers le bas sur le récipient, la masse volumique augmente un peu, ce qui entraîne une variation de pression, si bien que les parties de l'eau situées plus en bas, ayant une pression plus grande, peuvent soutenir les couches d'eau qui sont au-dessus.

D'ailleurs cet exemple n'est pas tellement absurde, si l'on imagine une situation où un récipient plein d'eau, en chute libre, est ralenti et puis arrêté : dans la phase initiale, durant la chute libre, tout se passe justement comme s'il n'y avait pas de gravité.

On voit là qu'au lieu d'une *démonstration* faisant appel à une nécessité logique et à un *enchaînement déductif*, comme c'est le cas dans les présentations usuelles de la loi de la statique des fluides, il y a plutôt *une histoire qui se déroule*, pour montrer comment il arrive que les choses soient comme ça. Il y a de quoi satisfaire l'envie d'images et d'histoires de la pensée commune. Et on s'appuie sur les *conceptions d'ancrage* qu'on a décrites auparavant.

Il faut préciser que, dans le déroulement de notre séquence, nous n'avons pas mis en œuvre complètement la structure proposée ici. Des contraintes pratiques ont fait obstacle, surtout le peu de temps d'enseignement à disposition (3 heures) et aussi la difficulté d'introduire trop de modifications didactiques dans le contexte de l'enseignement universitaire, surtout si ces modifications ne sont pas conçues par l'enseignant même. En tout cas, le modèle mésoscopique proposé a fourni des moyens de raisonnement qui vont dans cette direction. L'utilisation des explications causales, en termes de transmission des interactions et des modifications locales, qui est au centre de la conception de la séquence, va dans ce sens et constitue un pont important, c'est notre hypothèse, entre le raisonnement commun et le discours scientifique, un pont qui peut favoriser des changements conceptuels non négligeables.

Une proposition plus ample, développant encore plus cette approche dans d'autres aspects et contenus, peut être envisagée comme un programme de recherche, à définir et réaliser sur la base des résultats de la présente recherche.

CHAPITRE 4. ETUDE DES RAISONNEMENTS : LES ENTRETIENS

Pour la recherche sur les conceptions des élèves et des étudiants concernant les fluides en situation statique, j'ai utilisé des entretiens et des questionnaires papier-crayon.

Les deux entretiens que je vais présenter dans ce chapitre constituent une première étape de mon étude des conceptions des apprenants. Mon idée était d'interroger deux élèves qui, à deux niveaux scolaires différents, du collège et du lycée, venaient d'étudier le sujet de la pression dans les fluides. Dans l'établissement scolaire italien que j'avais choisi, cela conduisait à considérer les élèves de deux classes de niveaux correspondant à une cinquième et à une seconde françaises. Parmi les élèves de ces classes, j'ai choisi quelqu'un n'étant ni trop fort ni trop faible, mais qui montrait d'être intéressé et disponible.

Le but de ces entretiens est d'obtenir des éléments pour comprendre l'image que les élèves se font des fluides et les raisonnements qu'ils utilisent pour expliquer le comportement et les propriétés des fluides.

Dans le prochain chapitre, je présenterai la partie de la recherche basée sur les questionnaires écrits.

4.1 Objectifs

Les recherches d'autres auteurs ainsi que mes investigations et observations préliminaires plus informelles fournissent des indications sur les typologies de raisonnements attendus, qui constituent un guide pour le choix des questions à poser et les interventions à faire lors des entretiens.

Parmi ces indications, je retiens ici principalement les suivantes (cf. chap.2).

- La plupart des élèves pensent, correctement, que la pression augmente avec la profondeur, mais pour beaucoup d'entre eux elle dépend aussi du volume total du fluide, et elle « agit » seulement, ou surtout, vers le bas. Cette idée d'action en direction verticale entraîne parfois l'idée que la présence d'un obstacle, d'un objet ou d'un bateau situés au-dessus du point considéré peut changer la valeur de la pression, en provoquant son augmentation ou en diminution, selon les cas.
- Souvent, la pression est traitée par les élèves comme si elle était une grandeur vectorielle ; ils semblent utiliser une notion indifférenciée de pression-force, avec une identification de la pression avec la force pressante. Dans cette conception, la pression-force est parfois identifiée avec le poids du fluide.
- Dans plusieurs situations, surtout (mais pas uniquement) pour les gaz, la pression est liée au *tassement*, ce qui peut entraîner l'idée que dans un récipient plus petit la pression est plus grande, suivant l'intuition qu'en diminuant le volume, le tassement augmente.
- Certains éléments font penser qu'il n'y a pas une séparation nette, dans la pensée des élèves, entre les conceptions concernant les liquides et les gaz. Mon hypothèse est qu'il y a des représentations assez générales qui peuvent s'activer, selon la situation envisagée, pour tous les fluides, même si certaines sont associées de préférence avec les liquides et d'autres avec les gaz.

Avec les deux entretiens qui suivent, je me propose d'étudier les conceptions et les raisonnements des élèves concernant la pression dans les fluides, en me servant des indications décrites plus haut comme points de repère, mais aussi en favorisant l'expression d'autres idées éventuelles. Je veux aussi tester comment ils réagissent face à un discours visant à déstabiliser leurs conceptions, et quels changements cette déstabilisation peut provoquer dans leur description des situations proposées.

La conduite des entretiens sera plutôt ouverte au début de chaque situation proposée, l'enquêteur essayant de faciliter au maximum la libre expression de l'élève et d'éviter de suggérer des réponses prédéterminées. L'élève sera sollicité à mieux expliciter sa pensée par la proposition de petites variations de la situation physique.

Dans les cas où l'élève n'arrive pas à expliciter ses raisonnements, même après avoir été sollicité plusieurs fois et de façon différente, je propose des morceaux de raisonnements possibles parmi ceux déjà observés précédemment chez d'autres élèves. Il est évident que ce que l'élève va dire après ces suggestions doit être traité avec plus de prudence, surtout s'il s'agit de confirmations des idées proposées par l'intervieweur.

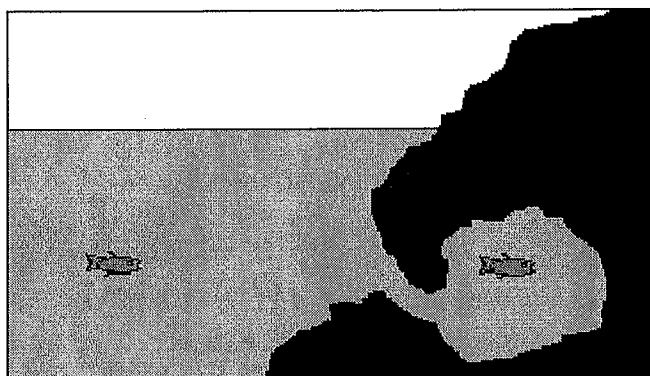
De façon plus précise, je me propose d'observer comment l'élève décrit et explique la pression dans les fluides, s'il y a des différences entre les conceptions relatives aux liquides et aux gaz, comment il interprète l'action et la variation de la pression dans l'eau et comment il prend en considération la différence de densité dans le cas de liquides autres que l'eau.

4.2 Protocole d'entretien

On propose quatre situations, accompagnées par des dessins.

Première situation proposée

* Regarde les deux petits poissons de la figure.



La pression de l'eau est-elle égale pour les deux poissons, ou plus grande pour le poisson dans la grotte, ou plus grande pour le poisson en pleine mer ?

Pourquoi ?

Il faut insister pour que l'élève justifie sa réponse, pour faire bien expliciter la représentation et le raisonnement utilisés.

Si la formule $p=F/S$ est évoquée, on demandera quelle surface et quelle force (ou poids) sont en cause.

Si l'élève parle de la profondeur ou du poids (ou quantité) d'eau qui est au-dessus du poisson, on demandera de bien préciser comment il détermine ces grandeurs.

- * La pression pour le poisson dans la grotte change-t-elle, s'il change de position, tout en restant dans la grotte ? s'il va plus près des rochers, plus en haut ou en bas ?
- * Et si la grotte était plus grande, plus large ou plus haute ?

Deuxième situation proposée

- * Si l'on mesure la pression dans cette salle et à l'extérieur, on trouve la même valeur, ou bien une valeur plus grande dans la salle ou à l'extérieur ? Pourquoi ?

Il faut insister pour que l'élève justifie sa réponse, pour faire bien expliciter la représentation et le raisonnement utilisés.

Si la formule $p=F/S$ est évoquée, demander quelle surface et quelle force (ou poids) sont en cause.

- * Cela change-t-il si la fenêtre est ouverte ou fermée ? Pourquoi ?
- * Y a-t-il quelques analogies ou ressemblances entre les deux situations évoquées (grotte et salle) ?

Si la réponse est "oui", demander lesquelles.

Si la réponse est "non", donner des suggestions et demander l'avis de l'élève.

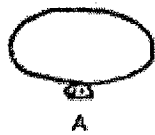
- * La comparaison entre les deux situations te pousse-t-elle à changer les réponses données auparavant ?
- * Si la réponse avait été "pression différente", il faut essayer maintenant de déstabiliser le raisonnement de l'élève, avec des observations comme les suivantes.
 - Dès qu'il y a communication entre grotte et pleine mer et entre salle et extérieur, cette différence de pression n'aurait-elle pas des effets et si oui, lesquels ?
 - L'eau et l'air pouvant passer librement de l'intérieur à l'extérieur, une différence de pression n'engendrerait-elle pas un courant d'eau ou d'air ?
 - Et ce courant ne parviendrait-il pas à égaliser les pressions ?

Troisième situation proposée

- * Un petit ballon de foire, gonflé, de forme sphérique, est porté dans une piscine pleine d'eau, à une bonne profondeur, par exemple 4 m.



Ballon hors
de l'eau



A



B



C



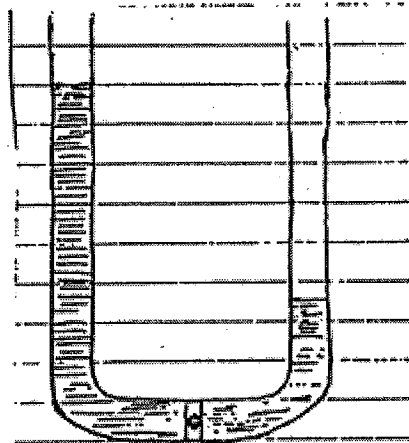
D

Les ballons

Quelle forme prendra-t-il parmi celles de la figure ?
Pourquoi ?

Quatrième situation proposée

* Regarde la figure 3. Il y a un tube en U avec deux liquides séparés au fond par une petite cloison qui peut bouger, une fois débloquée.



Cloison

Le tube en U

À gauche il y a de l'eau et à droite il y a un autre liquide ayant une densité double de celle de l'eau. Selon toi, si on débloque la cloison que se passe-t-il ? elle va à droite, elle va à gauche ou elle reste immobile ?

Pourquoi ?

4.3 Méthodologie utilisée

Je fais une **analyse thématique**, c'est-à-dire je cherche les idées principales que l'élève a exprimées dans l'entretien. Ces idées, ou conceptions ou raisonnements, je les cherche surtout dans les interventions dans lesquelles l'élève donne quelques explications ou motivations de ses réponses.

Je veux aussi examiner comment l'élève réagit face à un discours visant à déstabiliser ses conceptions et quels changements cette déstabilisation provoque.

L'**unité d'analyse** choisie est donc le *thème* ou l'*idée* exprimée par l'élève. Dans ce type d'analyse, « le texte peut être découpé en idée constituantes, en énoncés et propositions porteurs de significations isolables » [Bardin L 1993, p.136] pour repérer les noyaux des sens qui composent le discours de l'élève.

J'ai pris comme **unité minimale** de l'analyse chaque intervention de l'élève et ensuite j'ai fait un tri des interventions pour éliminer celles qui sont non significatives et associer celles qui sont porteuses d'une même idée de base. J'ai numéroté les interventions de l'élève pour les citer facilement dans la suite, par ex. L34 indiquera l'intervention n°34 de l'élève L.

J'ai classé les interventions en trois catégories :

- Les interventions **vides**, qui ne donnent aucune information de contenu, du type "je ne sais pas", "parce que oui", "boh", "quel petit poisson ?" etc.
- Les interventions **standard**, qui contiennent des réponses sèches, du type "oui", "non", "c'est A", "augmente", "plus grande" etc., sans aucun commentaire ou précision qui puisse donner des informations sur les idées ou les raisonnements qui ont conduit à la réponse.
- Les interventions **expressives**, dans lesquelles l'élève donne des informations sur ses idées ou sur son raisonnement, employant des phrases ou des mots (ou des gestes) personnels. Parfois une seule idée est exprimée sur deux ou trois interventions successives.

On cherchera dans ces dernières les indices des idées et des raisonnements de l'élève.

J'ai divisé le texte en sept parties, selon le contenu traité :

- partie **P**, sur la question des petits poissons ;
- partie **S**, sur la question de la pression dans la salle et à l'extérieur ;
- partie **PS**, comparaison des deux questions précédentes ;
- partie **DPS**, déstabilisation des conceptions de l'élève sur les deux questions précédentes ;
- partie **B**, question du ballon de foire ;
- partie **DB**, déstabilisation des conceptions de l'élève sur la question du ballon ;
- partie **T**, question du tube en U.

4.4 Analyse de l'entretien avec L

Il s'agit d'un élève italien, nommé L, âge 12½ ans, classe correspondant à la cinquième française.

Il a étudié une définition de pression en tant que F/S, dans un contexte de solides en contact.

Du texte de l'entretien, on voit que le discours de l'élève se compose de 115 interventions, alternées aux miennes. Les interventions de l'élève sont toutes assez courtes, souvent il s'agit de deux ou trois mots et seulement 23 interventions dépassent la longueur d'une ligne, dont 14 tiennent en deux lignes, 6 en trois lignes et 3 en quatre lignes. Le discours est donc très fragmenté et une seule intervention ne contient jamais plus d'une idée base, au contraire le plus souvent elle n'exprime qu'un morceau du raisonnement de l'élève et parfois elle n'exprime rien de significatif.

J'ai trouvé 24 interventions *vides*, 46 *standards*, 45 *expressives*.

4.4.1 Les réponses de l'élève

Les réponses de l'élève aux questions posées, données avant déstabilisation, sont les suivantes.

Poissons

La pression est plus grande pour le poisson en pleine mer, parce qu'il *a plus d'eau sur la tête* (L1, L3).

Si le poisson dans la grotte va plus près de la roche, il trouve une pression plus grande, parce que là il *y a plus d'eau, dans ce trou* (L11) (justification non bien explicitée).

S'il va plus en haut il trouve une pression moins grande et s'il va plus en bas il trouve une pression plus grande, parce qu'il *y a plus d'eau au-dessus* (L18).

Si la grotte était plus grande, la pression augmenterait, parce qu'il *y aurait plus d'eau* (L25) ; si elle était plus large mais de la même hauteur, la pression serait inférieure, parce que *l'eau se dispose dans tout le trou* (L27) (justification insuffisamment explicitée).

Salle

La pression à l'extérieur est plus grande que dans la salle, parce que *l'air pèse et alors écrase* et à l'extérieur *il y a plus d'air au-dessus, sur la tête*. (L34-L35)

Si la fenêtre est fermée, la pression diminue, parce que *nous avons consommé un peu d'air, d'oxygène* (L40).

Ressemblance poissons-salle

Il y a une ressemblance entre les deux situations précédentes, parce qu'on parle de *la pression à l'intérieur, soit de la grotte, soit de la salle, et de la pression à l'extérieur* (L50), même si *au lieu de l'eau qui fait la pression, c'est l'air* (L48) et *la grotte est toujours ouverte* (L49).

Ballon

Au fond de la piscine, le ballon prend la forme A, *parce qu'il est écrasé* (L74), *dès qu'il y a pression, d'en haut, il se déforme, s'écrase, mais horizontalement* (L79-80), pas comme en B (L80).

Tube en U

Dans le tube en U la petite cloison *reste immobile parce que le liquide de densité double est la moitié du liquide de densité moitié* (L97). En tout cas si l'eau était plus que le double il y aurait une pression plus grande de la part de l'eau et alors elle bougerait vers la droite (L100). Si la densité de l'eau était un tiers de celle de l'autre liquide, la cloison bougerait vers l'eau, vers la gauche (L103).

La quantité de liquide est mesurée par la longueur du tube jusqu'à la cloison, la courbe comprise (L104÷106), puis par le volume (L108÷112), enfin par le poids (L113÷115).

Cette partie *T* est celle dans laquelle l'élève répond avec le plus de cohérence et de certitude, ce qui est montré aussi par le plus haut pourcentage d'interventions expressives (13 sur 19, soit 68 %, contre 45/115 soit 39 % dans la totalité de l'entretien) et des interventions longues de plus d'une ligne (9 sur 19 soit 47 %, contre 23/115, soit 20 % dans la totalité de l'entretien).

4.4.2 Les idées de l'élève

Le fluide sur la tête

L'idée principale que l'élève a exprimée dans l'entretien est sans doute la conception selon laquelle la pression dépend de la *quantité* de fluide au-dessus, *sur la tête*, suivant l'expression qu'il a utilisée plusieurs fois. Parce que le fluide *pèse* et donc *écrase* ce qui est au-dessous. Cette idée, que j'appellerai dans la suite *l'idée du fluide sur la tête*, est présente avec une remarquable cohérence dans les trois situations des poissons, de l'air, du ballon. On la retrouve de façon explicite dans 13 interventions *expressives* sur les 19 des parties *P*, *S*, *B*, avec les mots *sur la tête* (7 fois), *au-dessus*, *d'en haut*, *écrase*.

La différence entre les situations *P*, *S*, *B* et la situation du tube en U est que, dans ce dernier cas, l'élève n'utilise plus les expressions du type *liquide au-dessus* et il considère la quantité totale de liquide dans le tube, de chaque côté de la cloison. D'ailleurs, dans cette situation, la cloison est en effet située dans la partie la plus basse du système, tout le liquide est donc en quelque sorte au-dessus d'elle, il n'y a pas besoin de spécifications, il n'y a pas de liquide au-dessous. De plus, le tube pourrait fonctionner comme un guide qui conduit tout le poids du liquide à pousser contre la cloison.

La quantité de fluide

L'élève montre un peu d'incertitude dans la définition de ce qu'est pour lui la *quantité* de fluide. Interrogé sur ce point, il se réfère au volume, les *mètres cubes* (L2), *le volume*, les *litres* (L112), et parfois à la hauteur (L4, poissons) ou à la longueur (L104, tube). Mais à y bien regarder, il semble vraiment que pour lui, quantité de liquide soit synonyme de volume. On le voit bien dans la situation du tube en U, lorsqu'on lui demande ce qui se passerait si l'une des parties du tube était plus étroite : il répond que si le liquide à droite *était à la même hauteur mais le tube était un peu plus petit, il y en aurait moins et donc moins que la moitié* et la cloison se déplacerait vers la droite.

Je pense qu'il se limite à considérer seulement une longueur ou hauteur lorsque la situation suggère qu'il y a une seule dimension qui est censée varier et que la comparaison des volumes se réduit donc à la comparaison de cette dimension. Dès qu'on fait varier les autres dimensions, il explicite à nouveau que la quantité, c'est le volume : I. *Qu'entends-tu par quantité ?* L. *Le volume, les litres* (L112).

Le fluide pèse et alors écrase

La cause de la pression est clairement le poids : *l'air pèse et alors écrase* (L34). Dans les situations *P, S, B* il n'a pas utilisé explicitement les mots *peser, poids*, mais l'analogie forte qu'il a faite entre la situation avec l'eau et celle avec l'air nous assure que pour lui l'eau aussi *pèse et alors écrase* ; il n'a considéré nécessaire de le préciser seulement pour l'air, l'idée que l'air ait un poids étant pour lui moins évidente et probablement de plus récente acquisition. D'ailleurs, dans la situation du tube en *U*, il fait à nouveau référence au poids des deux liquides pour expliquer la pression.

Dans les situations *P, S, B* il y a un seul fluide, eau ou air, et donc plus de volume est toujours équivalent à plus de poids.

Dans la situation du tube en *U*, au contraire, il y a deux liquides différents et alors son raisonnement se précise mieux. Il considère tout de suite les deux facteurs densité et *quantité*, en les combinant moyennant un raisonnement de compensation multiplicative, ce qui signifie que pour lui la grandeur déterminante c'est le produit densité par volume. Et à la question "pourquoi volume et densité ?" il répond : *s'il a plus de densité il pèse plus, s'il est plus grand il pèse plus* (L114). Une réponse très claire : ce qui compte, c'est combien le liquide pèse, *le poids* (L115).

La pression-force

Toutes les réponses de l'élève montrent clairement que ce qu'il appelle *pression* ressemble plutôt à une *force pressante*, ou encore mieux à une *notion parente, indifférenciée* de "pression-force" [Karioutoglou et al. 1995]. Il ne considère jamais la surface, ni la définition $p=F/S$, qu'il vient pourtant d'étudier. Si le tube en *U* devient plus étroit, le volume diminue et donc la pression aussi diminue (L108÷112). Il est intéressant à remarquer qu'il a étudié la formule $p=F/S$ dans un contexte de solides en contact et il a aussi fait un graphique de la pression en fonction de l'aire, à force constante. Il n'utilise pas ces connaissances dans les situations proposées dans l'entretien, concernant les fluides.

Pression et tassement

Une autre idée sur la pression, seulement ébauchée, semble apparaître dans la situation des poissons.

L'élève dit que, si le poisson dans la grotte va plus près de la roche, il trouve une pression plus grande, parce que là *il y a plus d'eau, dans ce trou* (L11). Interrogé encore sur ce point il ne donne pas d'autres explications significatives. Cette expression *il y a plus d'eau* pourrait être interprétée dans le sens que là, au fond de la grotte, près de la roche, l'eau est plus tassée, il y en a plus dans le même volume, et donc que la pression serait liée au tassement.

Cette idée se retrouverait aussi là où l'élève dit que, si la grotte était plus large mais de la même hauteur, la pression serait moins grande, parce que *l'eau se dispose dans tout le trou* (L27). Interrogé encore sur ce point, il ne donne plus d'autres explications significatives, mais on pourrait penser à une idée de dilatation de l'eau dans une grotte maintenant élargie.

Il faut préciser que, sur ce point, les éléments à disposition ne sont pas suffisants pour tirer une conclusion bien fondée, on peut seulement proposer une hypothèse un peu risquée.

La respiration

La fermeture de la fenêtre est vue par l'élève comme une fermeture totale : l'air ne peut pas passer. Il pense qu'en respirant nous consommons de l'air ou de l'oxygène (L40) et donc que la quantité d'air dans la salle diminue, ce qui entraîne une diminution de pression.

Lorsqu'on ouvre la fenêtre, *de l'air nouveau avec l'oxygène entre* (L45) et la pression augmente.

L'air incompressible

Sur le problème du ballon, après déstabilisation et beaucoup d'hésitations, l'élève arrive à indiquer la solution C (ballon sphérique mais plus petit), mais tout de suite et spontanément il dit *mais alors de l'air devrait s'en aller du ballon* (L91), *parce que s'il devient plus petit, comment fait-il ?* (L92). Il semble donc penser que l'air est incompressible. Et il ajoute que s'il restait tout dans le ballon *alors il deviendrait liquide*.

4.4.3 La déstabilisation

La déstabilisation a produit un changement évident dans les réponses de l'élève, mais l'attitude de celui-ci a été assez différente dans les deux situations poissons-salle et ballon.

Poissons et salle

L'élève a tout de suite accepté le raisonnement proposé par l'enquêteur (si la pression était différente l'air ou l'eau avec pression supérieure devraient pousser plus fort et donc entrer dans la salle ou la grotte) et l'a intégré dans sa description.

Il dit en effet qu'il doit y avoir du vent et du courant d'eau (L59÷62), ensuite il précise que ce mouvement existe seulement pour un temps limité, *jusqu'à ce que la pression soit égale à celle de l'extérieur* (L63). À ce moment, il s'aperçoit que ce raisonnement est en contradiction avec sa réponse précédente ; il hésite un instant et conclut que *la pression est égale dedans et dehors ... parce que si la pression est égale il n'y a plus de vent parce qu'il ne pousse plus* (L65). Et il confirme cette conclusion 5 fois (L67÷71).

Il semble que les objections de l'enquêteur aient poussé l'élève à passer de la description d'une phase transitoire, dans laquelle il y a un déséquilibre, à la nécessité d'envisager une phase permanente, lorsque l'équilibre s'est établi.

Ballon

L'objection de l'enquêteur est que la pression de l'eau devrait écraser aussi les côtés du ballon, parce que, dit-il, *"lorsque tu es sous l'eau debout, sur l'oreille tu sens la pression ; même horizontalement..."* (I84). L'élève est d'accord, mais en même temps exprime son incertitude sur les conséquences de ce raisonnement : *oui et pourtant* (L83), *eh* (silence) (L85). Puis il se décide pour la solution B (ballon allongé verticalement), mais il change plusieurs fois d'avis : *alors c'est B // tous deux* (L86), *je ne sais pas / B* (L87), (silence) *B ... et alors je ne sais pas / ça reste pareil ... non c'est B* (L88-89), jusqu'à arriver à la solution C (L90), après une nouvelle intervention de l'enquêteur soulignant que l'eau pousse de la même façon de tous les côtés.

Mais il n'est pas encore satisfait et il formule spontanément sa propre objection : *mais alors de l'air devrait s'en aller du ballon* (L91), *parce que s'il devient plus petit, comment fait-il ?* (L92).

Toutes ces incertitudes et ce parcours tortueux montrent que l'élève a accepté sans trop de conviction les objections de l'enquêteur et n'arrive pas bien à les coordonner avec son raisonnement. L'idée du *fluide sur la tête*, qui *pèse et alors écrase*, est trop forte dans ce cas pour accepter facilement que l'eau appuie aussi sur les côtés, et, surtout, de la même façon.

4.4.4 Synthèse

La plupart des affirmations de l'élève peuvent être interprétées comme l'expression d'une seule conception de base, selon laquelle le poids est une propriété, une vertu, que possèdent les fluides, comme d'ailleurs les objets solides, et qui leur permet d'agir, de pousser sur les objets au-dessous, avec une pression-force d'autant plus importante que le poids du fluide concerné est plus grand. Si les deux fluides sont en contact, en poussant l'un contre l'autre, il s'engendre une lutte dans laquelle va gagner le fluide avec le plus de poids, qui alors déplace l'autre. C'est l'idée du *poids action* (cf. par.3.4). Dans le cas du tube en U, le tube fonctionne comme un guide qui conduit le poids des liquides à pousser contre la cloison.

Cette conception me semble être en mesure de bien expliquer toutes les interventions du type *fluide sur la tête* et la totalité des interventions concernant le tube en U, ce qui fait au total 26 interventions expressives sur les 32 des parties *P, S, B, T*.

Elle peut aussi expliquer l'attitude différente de l'élève face à la déstabilisation mise en œuvre par l'enquêteur dans les situations *P-S* et *B*.

En effet, le raisonnement proposé par l'enquêteur pour les situations *P-S* (si la pression était différente, l'air ou l'eau avec une pression plus grande devraient pousser plus fort et donc entrer dans la salle ou la grotte) peut bien s'inscrire dans cette conception du *poids-action*. L'élève l'a donc facilement intégré dans sa description, il dit qu'en effet il y a du vent et du courant d'eau, sauf à s'apercevoir rapidement que ce mouvement ne peut durer à jamais. Il conclut, avec conviction, qu'après quelque temps la pression doit s'égaliser (L63÷65), *parce que si la pression est égale il n'y a plus de vent parce qu'il ne pousse plus* (L65), même si elle est en contradiction avec la première réponse donnée.

Au contraire, dans la situation *B* il accepte l'objection de l'enquêteur, mais sans conviction et il n'arrive pas bien à la coordonner avec son raisonnement.

L'élève ne fait aucune distinction entre *pression* et *force pressante*, il utilise une *notion indifférenciée* de pression-force [Karioutoglou et al. 1995] et ne considère jamais la surface ni la définition $p=F/S$ qu'il vient pourtant d'étudier.

Une autre idée, seulement ébauchée, semble apparaître dans la situation des poissons : que la pression varie selon que l'eau est plus ou moins tassée ou concentrée. Il s'agirait de la transposition au cas de l'eau d'une conception très répandue pour les gaz [Séré 1985]. L'eau serait plus tassée au fond de la grotte, près de la roche, et moins tassée si on élargit la grotte.

Etrangement, l'élève semble parfois penser que l'air est incompressible, son volume ne pouvant varier, sauf en le liquéfiant.

L'élève pense que, puisqu'en respirant nous consommons de l'air ou de l'oxygène, la quantité d'air dans la salle diminue, ce qui entraîne une diminution de pression.

Dans la discussion sur les situations des poissons et de la salle, l'élève raisonne parfois avec une description en deux temps : une phase transitoire, dans laquelle il y a un déséquilibre, et une phase permanente, lorsque l'équilibre s'est établi. Spontanément il se situe dans la phase transitoire et c'est seulement après les objections de l'enquêteur qu'il se rend compte de la nécessité d'envisager la phase permanente.

L'élève a bien vu la ressemblance entre les situations des poissons et de la salle et a donné des réponses cohérentes avec cette ressemblance. Il traite de la même façon la pression dans l'air et dans l'eau.

La déstabilisation a produit un changement évident dans les réponses de l'élève, mais elle a été plus efficace dans la situation poissons-salle, parce que dans ce cas les objections étaient plus facilement assimilables aux conceptions de l'élève.

4.5 Analyse de l'entretien avec D

Il s'agit d'une élève italienne, nommée D, âge 15 ans, classe correspondant à la seconde française.

Elle n'a pas encore étudié le sujet de la pression dans les fluides dans le cours de physique du lycée, mais elle l'a rencontré pendant le cours de science au collège.

Je ferai une analyse moins détaillée que celle de l'entretien précédente, en me limitant à esquisser les caractéristiques générales du raisonnement de l'élève et les idées principales qu'elle manifeste.

Elle fait des interventions plus longues que L. Elle parle plus longtemps et plus spontanément.

Pendant l'entretien elle change plusieurs fois d'avis, suite à mes interventions. Elle donne souvent des explications et des exemples qui font référence aux effets de la pression sur les personnes.

4.5.1 Les réponses et les idées de l'élève

Sur la situation des poissons elle répond d'abord que la pression doit être égale dans la grotte et en pleine mer, parce que les plongeurs peuvent passer sous une voûte de rochers sans gêne.

Sollicitée à donner une explication physique, elle se bouscule et change d'avis : la pression serait plus grande en pleine mer, parce que "l'intérieur est protégé par la roche ... quelque chose de concave". Et après elle récite : "plus une personne va en profondeur, plus *l'on dit* qu'elle subit de la pression, parce que la force exercée par l'eau augmente".

Elle reprend aussi l'idée que, dans la grotte, "le poisson *est protégé ... il atteint une sorte d'abri*".

Ensuite elle précise que, si la grotte était plus haute, la pression serait plus grande et qu'en se déplaçant vers le haut de la grotte il trouverait moins de pression, à cause de la moins grande hauteur de l'eau ; tandis que s'il se déplaçait horizontalement, ça ne changerait rien, sauf à s'approcher de l'ouverture de la grotte, où la pression augmenterait, pour atteindre graduellement la valeur de la pression en pleine mer.

Et les plongeurs ? Ils ont leurs appareils pour s'adapter, d'ailleurs c'est ce qu'ils font quand ils remontent en surface. Et l'affaire est réglée.

Dans la situation de la salle, au contraire, elle n'a pas de doute, la pression est égale, "parce qu'on est sur la terre et s'il y avait un changement de pression, on le sentirait ... on aurait mal à la tête ... les oreilles qui sifflent". Et puis "on est au niveau de la mer, que l'on soit à l'intérieur ou à l'extérieur".

En marge, elle évoque spontanément une liaison entre pression et pesanteur : "comme sur la Lune, où il n'y a pas la même pression, il n'y a pas la même impression de pesanteur". Et sur la Lune la pression est plus faible, parce que "les astronautes ont beaucoup moins de mal à marcher". Donc, plus de pesanteur correspond à plus de pression. Mais pression de quoi ? À la question où l'on demande s'il y a de l'air sur la Lune, elle répond "non".

Face à une question explicite, elle reconnaît qu'il y a une ressemblance entre les deux situations des poissons et de la salle, parce qu'il y a "quelqu'un qui est à l'intérieur ou à

l'extérieur", mais elle ne croit pas "qu'on puisse mettre l'eau à la place de l'air ... il n'y a pas d'analogie en ce qui concerne la pression". Mais ensuite, elle commence à en douter et conclut que la pression doit être égale pour les poissons aussi.

Elle trouve très convaincante l'objection qu'une différence de pression entraînerait un courant d'eau et articule une longue argumentation pour démontrer que, finalement, la pression ne peut pas être différente.

Pour la situation du ballon elle choisit la réponse D, mais elle n'avait pas bien vu que, dans cette réponse, le ballon devenait plus grand. Elle voulait répondre qu'il demeurerait égal, parce que "l'air qui est à l'intérieur du ballon lutte en un certain sens avec l'eau, qui tend à l'écraser ou à le comprimer ... normalement il devrait rester le même". Puis elle en doute et dit que la bonne réponse pourrait être aussi la A, dans laquelle le ballon est écrasé verticalement, "parce que l'eau exerce une pression vers le bas, et donc il devrait s'élargir sur les côtés". Elle conclut sagement : "ou bien il reste pareil, ou bien c'est l'autre solution, c'est 50/50".

Dernière situation, du tube en U. D'emblée elle est dans la confusion : "vers la gauche", "vers la droite", "non vers la gauche", jusqu'à se stabiliser finalement sur la réponse "vers droite", *"parce que même si l'eau est moins dense, il y en a une plus grande quantité ... et donc la pression exercée par l'eau est plus forte ... jusqu'au point où la pression de l'eau aura établi un équilibre avec la pression de l'autre"*. Et même s'il y avait moins d'eau le déplacement serait toujours vers la droite, sauf "s'il y avait moins d'eau que de produit", car dans ce cas "ce serait l'inverse et le déplacement se ferait vers la gauche".

4.5.2 Synthèse

Les raisonnements activés pour l'eau et pour l'atmosphère sont assez différents.

Dans le cas de l'eau, l'élève se stabilise sur un raisonnement fondé sur l'idée que la pression augmente avec la profondeur, calculée verticalement vers le haut jusqu'à la surface de l'eau ou jusqu'au rocher, même si elle utilise l'expression impersonnelle *l'on dit que*, qui n'exprime certainement pas une forte conviction.

L'idée de l'action du poids, qui pousse et écrase vers le bas, est reprise aussi à propos des situations du ballon et du tube en U.

Dans cette dernière situation, elle ne raisonne pas en termes de compensation entre deux facteurs en opposition (la quantité et la densité des liquides). Après quelques hésitations, elle considère que le facteur déterminant est la quantité de liquide, même s'il n'est pas clair si elle prend en compte la hauteur ou le volume du liquide.

Elle exprime aussi l'idée que la pression est moindre à l'intérieur, parce que là on est *plus protégé*, on est *à l'abri*.

La pression apparaît comme un concept qui exprime la capacité du liquide à pousser, sa force de poussée, qui fait décider le sens du déplacement, quand il y a deux fluides qui se contrastent. D'ailleurs elle s'exprime en termes de *lutte* entre l'air qui est dans le ballon et l'eau, qui tend à l'écraser. Dans la situation du tube en U, elle dit clairement que le déplacement se termine lorsque *les pressions s'équilibrent*.

4.6 Conclusions

Les deux élèves consultés se rejoignent sur plusieurs points, mais ils diffèrent aussi sur quelques aspects.

Tous les deux utilisent une notion indifférenciée de pression-force, dans laquelle la pression est surtout "la capacité du fluide de pousser", aussi en "lutte" contre un autre fluide.

Ils voient la pression et les forces liées agissant surtout ou seulement en direction verticale, ils négligent souvent les actions en direction horizontale.

Tous les deux pensent que la pression augmente avec la profondeur, mais ils manifestent des raisonnements différents sur ce point. D. évoque la loi de l'hydrostatique $p \propto h$, sauf à ne pas la respecter ou à la contredire rapidement. L. ne considère pas cette règle, il raisonne en termes qualitatifs et d'actions causales, en évoquant plutôt l'action du poids du fluide au-dessus.

Cette idée, de l'action du poids du fluide au-dessus, est très forte et omniprésente chez L., qui l'exprime avec l'image du "fluide sur la tête", une expression efficace que je reprendrai souvent dans la suite pour indiquer cette typologie de raisonnement. Chez D., au contraire, s'activent différentes conceptions ; celle du "fluide sur la tête" est bien présente, mais à côté d'autres, et pas aussi clairement que chez L.

L. voit tout de suite et spontanément la ressemblance entre les deux situations de la grotte et de la chambre et traite de la même façon l'eau et l'air. D. ressent ces deux situations comme étant très différentes ; après sollicitation, elle reconnaît une certaine similitude, mais elle insiste sur le fait qu'en tout cas, on ne peut pas traiter de la même façon un liquide et un gaz.

Concernant l'effet de la présence d'un endroit plus petit et clos (la grotte et la chambre), les deux élèves ont des réactions opposées. L. pense que dans un endroit plus petit le fluide sera plus tassé et donc que la pression sera plus grande. Cette idée l'amène aussi à imaginer que les liquides sont compressibles. D. pense qu'à l'intérieur de la grotte et de la chambre on est plus protégé, plus à l'abri, et donc que la pression y sera plus petite.

Ces constats poussent à cibler l'enquête par questionnaires sur les points suivants :

- Le rôle du poids dans les explications concernant les fluides en présence de la gravité.
- L'interprétation de la loi de l'hydrostatique et son application dans des cas critiques.
- L'effet sur la pression d'être situé dans un endroit plus petit, plus ou moins clos.
- La comparaison entre le comportement des liquides et des gaz.
- La compressibilité ou non-compressibilité des liquides et des gaz.
- Les caractéristiques (direction, intensité) des forces agissant sur un objet solide immergé dans un fluide.
- La connexion entre les forces de pression et la poussée d'Archimède.

ANNEXE 1. Texte de l'entretien avec L.

- I. Regarde les deux petits poissons de la figure. La pression de l'eau est égale pour les deux poissons, ou plus grande pour le poisson dans la grotte, ou plus grande pour le poisson en pleine mer ? Et pourquoi ?
- L1 Celui en pleine mer parce qu'il a plus / d'eau / sur la tête / enfin (silence)
- I. Sur la tête ...
- L2 Il a plus de mètres cubes sur la tête
- I. Mètres cubes, tu dis
- L3 Même si enfin / il a plus d'eau sur la tête / donc il y a plus de pression
- I. Il a plus d'eau sur la tête et donc il y a plus de pression / heu / plus d'eau sur la tête / tu dis dans quel sens
- L4 Eh / d'une hauteur majeur sur la tête
- I. Et quel est cette hauteur pour le poisson en pleine mer ? Tu peux me l'indiquer avec le crayon à quelle eau tu te réfères ?
- L5 Celle-ci (indique la distance entre le poisson et la surface de la mer)
- I. Okay / et pour / pour le poisson dans la grotte / quelle est la hauteur ?
- L6 Celle-ci (indique la distance entre le poisson et la surface supérieure de la grotte)
- I. Celle-ci / très bien / écoute / si le petit poisson / si le petit poisson se déplace dans la grotte / eh il change de position
- L7 Quel petit poisson ?
- I. Celui qui est dans la grotte / au lieu d'être ici il se déplace par exemple plus proche à la roche ou / plus proche à l'ouverture / la pression change à ton avis ?
- L8 (silence) Boh (exclamation pour dire "je ne sais pas") // oui // boh je ne sais pas
- I. Tu avais dit oui / c'est-à-dire ?
- L9 C'est-à-dire il y a plus de pression s'il va plus vers / plus vers la roche
- I. S'il va plus près de la roche il y a plus de pression / s'il va plus près de l'ouverture il y a moins de pression / pourquoi ?
- L10 Boh
- I. Tu n'as aucune idée du pourquoi ?
- L11 Parce que s'il se déplace plus vers la roche / dans ce trou il y a plus d'eau / et alors
- I. Dans ce trou il y a plus d'eau / Quel trou ?
- L12 Mais celui de la roche
- I. La grotte ?
- L13 La grotte
- I. Ah dans la grotte il y a plus d'eau / pourquoi il y a plus d'eau ? l'eau est toujours la même
- L14 Oui mais (silence)
- I. Mais ?
- L15 Eh je ne sais pas
- I. Et s'il va plus en haut ou plus en bas / ça change la pression ?
- L16 Boh // oui s'il va plus en haut elle diminue
- I. Et s'il va plus en bas ?
- L17 Elle augmente
- I. Pourquoi ?
- L18 Et parce qu'il a plus d'eau au dessus s'il va en bas
- I. Voilà / ça je comprends / mais je ne comprends pourquoi tu avais dit que s'il se rapproche plus à la roche / ici / tout en restant à la même hauteur / la pression est plus grande ici que disons ici près de l'entrée / Tu saurais y réfléchir encore un peu / pour

- quelle raison selon toi ?
- L19 Parce que / boh
- I. Pourquoi ? C'est la roche qui fait une pression ?
- L20 Non (il rit)
- I. Ce n'est pas la roche / qu'est-ce qui fait la pression ?
- L21 L'eau
- I. L'eau et alors ?
- L22 Et / je ne sais pas
- I. Tu ne sais pas / bien / et si la grotte était plus grande la pression serait différente ?
- L23 Oui
- I. Oui c'est-à-dire elle serait ?
- L24 Plus grande
- I. Plus grande / pourquoi ?
- L25 Il y aurait plus d'eau
- I. Toujours pour la même raison / et si elle était plus large / dans le sens / ainsi / plus large | plus profonde <L> -| mais pas plus haute |-- plus profond <L> --| le trou plus profond mais toujours de la même hauteur disons
- L26 Elle serait / plus petite
- I. La pression serait plus petite / pourquoi ?
- L27 Parce que dans la grotte la // la chose / l'eau / se dispose dans tout / dans tout le trou / et alors / et alors il y a moins de pression
- I. L'eau se dispose dans tout le trou et alors il y a moins de pression / pourquoi ?
- L28 Parce que
- I. Essaie d'expliquer encore mieux / Pourquoi y a-t-il moins de pression ? l'eau se dispose / mais il y a plus d'eau / si la grotte est plus longue il y a plus d'eau
- L29 oui il y en a plus / mais celle qui est sur la tête est égale
- I. Voilà / mais pourtant la pression est plus petite / pourquoi elle est plus petite ? / Parce que la grotte est plus large ? et le poisson est moins coincé ?
- L30 ça n'a rien à voir
- I. ça n'a rien à voir / Parce que l'eau se dispose mieux donc elle moins comprimée ?
- L31 Eh peut-être / (il rit) je ne sais pas
- I. Tu ne sais pas / très bien / maintenant on change de sujet / la question est la suivante / maintenant nous sommes dans cette salle / avec la fenêtre ouverte disons (il ouvre la fenêtre puis il la ferme) / si je mesure la pression avec un instrument qui mesure la pression / un baromètre ou manomètre / ici dans cette salle et à l'extérieur, on trouve la même valeur, ou une valeur plus grande dans la salle, ou une valeur plus grande à l'extérieur en plein air ?
- L32 En plein air
- I. En plein air on trouve une pression ... ?
- L33 heu / plus grande
- I. Plus grande / pourquoi on trouve une pression plus grande en plein air ?
- L34 (silence) parce que / pourquoi ? / parce que l'air pèse / et alors ça écrase
- I. Alors / écrase tu as dit
- L35 Mais / il y a plus de pression / parce qu'il y a plus d'air au dessus (il indique sa tête)
- I. Plus d'air sur... ? / parce que le problème est | la caboche <L> -| que tu fais les gestes mais le magnétophone (il rit) ne les enregistre pas |-- je le sais <L> (il rit) --| avec les gestes tu exprimes mais dis-le avec la voix / il y a plus d'air au dessus et donc ça presse sur la tête / c'est ça que tu veux dire ?
- L36 Oui

- I. J'ai compris / et donc à l'intérieur il y en a moins / c'est ça que tu veux dire ?
- L37 Oui
- I. Oh et |- ça devrait <L> -| eh ? |-- rien <L> --| le fait que la fenêtre soit ouverte ou fermée change la situation ou non ? (il ouvre la fenêtre) y a-t-il quelques changements à part le froid qui entre maintenant (il ferme la fenêtre) eh ? c'est-à-dire la situation change ou c'est toujours comme auparavant ?
- L38 L'air devient plus propre (il rit)
- I. Oui mais à part que l'air devient plus propre / justement / en plus ça dépend / ça dépend comment c'est au dehors / la pression est comme auparavant plus grande à l'extérieur et plus petite à l'intérieur ou au contraire il y a quelques différences ?
- L39 Ca a changé
- I. Pourquoi ça a changé ?
- L40 Parce que / parce que nous avons consommé un peu d'air et alors / eh non / de l'oxygène / et alors quand nous ouvrons la fenêtre il rentre
- I. Oui / et donc la pression ?
- L41 Augmente
- I. Augmente quand nous ouvrons la fenêtre ? / c'est ça que tu veux dire ? quand la fenêtre est fermée la pression |- mais non <L> quand il est entré -| j'ai compris mais tu veux dire que quand la fenêtre est fermée la pression diminue pendant que nous respirons ? Mais dis
- L42 Pendant que nous respirons la pression diminue
- I. parce que nous consommons
- L43 l'oxygène
- I. l'oxygène / et donc la pression est toujours plus petite que celle à l'extérieur
- L44 Oui
- I. Encore plus disons / ensuite tu ouvres la fenêtre et que se passe-t-il ?
- L45 De l'air nouveau entre avec l'oxygène
- I. Avec de l'oxygène / et la pression ?
- L46 Augmente / mais elle est encore plus petite que celle / que celle à l'extérieur
- I. Très bien / maintenant je te pose une autre question / entre les deux questions que je t'ai posées auparavant, celle des petits poissons et celle de la salle, selon toi y a-t-il quelques ressemblances ou s'agit-il de deux sujets tout à fait différents ?
- L47 Il y a une ressemblance
- I. Laquelle ?
- L48 La pression / au lieu de l'eau qui fait la pression c'est de l'air
- I. Oui d'accord / mais je veux dire dans la question / la situation
- L49 Non parce que la grotte est toujours ouverte / au contraire ici
- I. Mais la ressemblance consiste en quoi ?
- L50 Que l'un est à l'extérieur et l'un à l'intérieur / la pression à l'intérieur soit de la grotte soit de la salle et la pression à l'extérieur
- I. Donc la grotte serait comme
- L51 la salle / et la pleine mer serait comme en dehors de la salle
- I. J'ai compris / et donc le problème serait à peu près le même sauf que ici la fenêtre serait toujours ouverte |- oui <L> -| et donc la réponse est toujours la même / la pression est plus grande à l'extérieur
- L52 et plus petite dedans
- I. parce qu'il y a la même situation / mais tu avais pensé tout de suite que la situation était pareille ou seulement après que je t'ai posé la question ? Tu y avais pensé tout de suite ?

- L53 Oui
I. Et pourquoi tu ne l'as pas dit ?
- L54 Boh
I. Maintenant je vais te faire une autre remarque / tu as dit que la pression est plus grande à l'intérieur et plus petite à l'extérieur / mais si ici la pression de l'eau est plus grande, et plus petite dans la grotte, l'eau qui est dehors ne devrait pas pousser et entrer dans la grotte ?
- L55 Si
I. Et comment peut-il continuer à y avoir une pression plus grande dehors et plus petite dedans / l'eau ne pousserait-t-elle pas ? et aussi dans le cas de l'air ? Si j'ouvre la fenêtre ne devrait-il pas arriver que l'air entre jusqu'à augmenter la pression dedans ? Que penses-tu de cette objection ? est-elle exacte ?
- L56 Non je n'ai pas compris
I. Si la pression dehors est plus grande que dedans alors si l'air a une pression plus grande il pousse plus fort que si l'air a une pression
- L57 plus petite
I. Alors l'air dehors devrait pousser celui dedans et entrer dans la salle et il devrait y avoir une sorte de continu...
- L58 de pression continue
I. non / non pas de pression mais de...
- L59 vent
I. Eh / mais existe-t-il ?
- L60 Oui il existe
I. C'est-à-dire ici il y a un mouvement continu de l'eau (indique l'entrée de la grotte) ?
- L61 Là oui
I.E Et ici il y a toujours un vent continu
- L62 Quand il est ouvert oui
I. Quand il est ouvert il y a toujours du vent / okay / mais
- L63 mais non / quand / quand tout l'air entre / c'est-à-dire il entre jusqu'à quand la pression est égale à celle de l'extérieur / et donc
- I. et donc ?
- L64 et donc / et donc oui / et donc elle est égale
I. Qu'est-ce qui est égal à quoi ?
- L65 La pression est égale dedans et dehors / quand / quand il n'y a plus de vent / parce que si la pression est égale il n'y a plus de vent |- il n'y a plus de vent <I> -| parce qu'il ne pousse plus
I. Alors si je te posais à nouveau la question tu répondrais comment?
- L66 Laquelle ?
I. Si je te posais la question si selon toi pour les petits poissons la pression est plus grande dedans ou dehors, ou si elle est égale ?
- L67 Elle est égale
I. égale ?
- L68 oui
I. Elle est égale / même si il y a moins d'eau dedans
- L69 oui
I. parce que si la pression était différente qu'arriverait-il ?
- L70 l'eau entrerait
I. jusqu'à
- L71 jusqu'à ce que la pression devienne égale dedans et dehors

- I. Très bien / une autre question / regarde ces petits ballons de foire
- L72 Oh Oh Oh
- I. Alors il y a un petit ballon |- oui <L> -| qui est celui-ci / un petit ballon de foire gonflé
|- oui <L> --| ce petit ballon est mis dans l'eau dans une piscine assez profonde / quatre
mètres // quand il est mis au fond dans l'eau / que se passe-t-il ? change-t-il de forme et
comment ? parmi ces formes de la figure laquelle te semble la plus apte pour le petit
ballon lorsqu'il est au fond ?
- L73 Cette-ci / A
- I. La forme A / Pourquoi A ?
- L74 Parce qu'il est écrasé
- I. Pourquoi est il écrasé ?
- L75 Mais ça doit être nécessairement un de ces quatre ?
- I. (inaudible) |- ah <L> -| oui ça doit être nécessairement un de ces quatre
- L76 Alors / qu'en sais-je ? attends
- I. Auparavant tu avais dit A
- L77 Parce que je pensais que ça devait être nécessairement un de ces quatre
- I. Et bien si ça doit être nécessairement un de ces quatre ?
- L78 C'est A
- I. Pourquoi A ?
- L79 Parce que / dès qu'il y a la pression / c'est comme ça
- I. Dès qu'il y a la pression ?
- L80 De haut / il se déforme / s'écrase oui / mais horizontalement pas ainsi (il indique la
solution B de la figure)
- I. Pas verticalement
- L81 Pas verticalement
- I. Es-tu sûr ?
- L82 Oui
- I. D'accord / mais la pression, tu dis, l'écrase d'en haut / ne l'écrase-t-elle pas aussi
sur les côtés ?
- L83 Oui et pourtant
- I. Lorsque tu es sous l'eau debout (inaudible) sur l'oreille tu sens la pression / même
horizontalement
- L84 Oui c'est évident
- I. Et alors ?
- L85 Eh (silence)
- I. Tu es toujours convaincu que c'est A ?
- L86 Non // alors c'est B // tous les deux
- I. Ah A et B, tous les deux
- L87 Non / Je ne sais pas / B
- I. Soit A soit B ?
- L88 (silence) B
- I. B pourquoi ?
- L89 Parce que / parce que c'est ainsi (fait un geste des mains qui indique une poussé
horizontale) et aussi ainsi (fait un geste des mains qui indique une poussé verticale) /
et alors je ne le sais pas / ça reste pareil (il rit) / non non c'est B
- I. Tu dis B donc / parce qu'il est écrasé / mais s'il est écrasé de tous les côtés // s'il est
écrasé de tous les côtés de la même façon / comment devrait-il être ?
- L90 (silence) uh // comme ça (il indique C)
- I. Eh oui pourquoi ?

- L91 Mais alors de l'air devrait s'en aller du ballon / eh
 I. ça c'est un problème / de l'air devrait s'en aller
- L92 Parce que s'il devient plus petit / comment fait-il ?
 I. Il devient plus petit / tandis que A et B restent du même volume |- ouais <L> -| ils sont déformés mais ils ont le même volume
- L93 Ils sont égaux
 I. Tu dis donc que de l'air devrait en sortir / la même quantité d'air ne pourrait elle |- eh
- L94 et alors il deviendrait liquide -| eh ?
 L95 oui
 I. Il pourrait aussi ne pas devenir liquide / c'est peut-être exagéré // l'air / la même quantité d'air peut-elle entrer dans un volume plus petit ?
- L96 Oui
 I. Bien / Une dernière question / regarde la figure / il y a un tube en U avec deux liquides séparés au fond par une petite cloison qui peut bouger si je la débloque et d'un côté à gauche il y a de l'eau et à droite il y a un autre liquide ayant une densité double de celle de l'eau / selon toi une fois débloquée que fait la cloison ? elle va à droite / à gauche / ou elle reste immobile ?
- L97 Alors / elle reste immobile / parce que / le liquide de densité double est la moitié du liquide de densité eh la moitié / et alors la pression est égale et elle ne bouge pas
 I. Double et moitié
- L98 Double et moitié
 I. Mais es-tu sûr que c'est la |- non
- L99 je suis pas sûr si c'est la moitié / il me semble que le liquide dont la densité est la moitié soit le double / non peut-être plus que le double / l'eau
 I. Dans ce cas, si c'était plus que le double
- L100 Dans ce cas il y aurait une pression plus grande de la part de l'eau et alors elle bougerait vers la droite
 I. Si c'était le contraire
- L101 Eh si celui de densité double était plus que la moitié / elle se déplacerait vers la gauche
 I. Donc tu dis le double de quantité et la moitié de densité / ces deux choses s'équilibrent
- L102 Oui / si c'est la moitié / si celui de densité double est la moitié / parce que double et moitié / eh
 I. Et si la densité était un tiers
- L103 Si elle était un tiers elle bougerait // vers / vers l'eau / vers la gauche
 I. Lorsque tu parles de quantité / que mesures-tu exactement ?
- L104 Eh // la longueur
 I. Quelle longueur ? Montre du doigt sur la figure
- L105 La longueur ici et ici
 I. Donc toute la longueur disons du tube |- oui <L> aussi la courbe -| la courbe comprise jusqu'à la cloison
- L106 Jusqu'à la cloison
 I. La courbe comprise jusqu'à la cloison / j'ai compris / si l'une des parties du tube avait été plus petite / plus étroite / ça changerait quelque chose ?
- L107 Oui
 I. C'est-à-dire ?
- L108 C'est-à-dire si celui-ci (il indique le liquide à droite) était à la même hauteur mais le tube était un peu plus petit / il y en aurait moins et donc / moins que la moitié et donc elle se déplacerait vers // vers la gauche / non / vers la droite
 I. Donc ce qui importe ce n'est pas la longueur du tube mais

L109 la pression / la quantité du liquide

I. Le volume ?

L110 Le volume oui

I. Tu as dit la pression / c'est-à-dire ? de quoi dépend la pression ?

L111 de la quantité

I. Qu'entends-tu par quantité ?

L112 Le volume / les litres

I. Mais alors si ça dépend seulement du volume celui-là devrait toujours gagner (il indique le liquide à gauche)

L113 Non / aussi / c'est vrai / aussi de la densité / du volume et de la densité

I. Et donc de quoi ? Pourquoi du volume et de la densité ?

L114 Parce que / du volume et de la densité / s'il a plus de densité il pèse plus / s'il est plus grand il pèse plus

I. Mais alors ça dépend de quoi ? Tu dis s'il a plus de densité il pèse plus / s'il est plus grand il pèse plus / c'est quoi alors qui est important ?

L115 La pression !- oui mais <I> -! le poids

I. le poids // bien merci

ANNEXE 2. Texte de l'entretien avec D

- I. Nous avons ici deux petits poissons / l'un est en pleine mer / l'autre dans une grotte / la question est la pression qu'ils ressentent est-elle égale pour les deux ou différente ?
- D1 Elle est égale
- I. Pourquoi est-elle égale?
- D2 J'ai pensé à l'exemple des plongeurs sous-marins / ils recherchent un certain niveau / et puis parfois il leur arrive d'entrer sous une voûte / et la pression ne change pas / car si elle changeait ils devraient respirer d'une façon différente / ou tout au moins s'adapter à ce nouveau milieu dans lequel ils se trouvent
- I. Je comprend / donc de cette expérience des plongeurs
- D3 J'ai pensé que pour les petits poissons c'était la même chose
- I. c'est la même chose / et si tu devais l'expliquer d'un point de vue physique ? Qu'est ce qui est égal ?
- D4 D'un point de vue physique c' est parce que la force exercée par l'eau dans les deux cas reste égale même si / hum / parce que / de toute façon si l'un nage dans la grotte et l'autre à l'extérieur / ah non / je me suis trompée //
- I. C'est à dire?
- D5 C'est à dire que le petit poisson qui nage en pleine mer subit plus de pression que celui qui est à l'intérieur / parce que celui qui est à l'intérieur est protégé |- par la roche ? <I> -| par la roche / et donc l'eau entre dans la grotte / comme si / elle pénètrait dans quelque chose de concave / et donc la poussée qui s'exerce sur le poisson à l' extérieur devrait être plus grande
- I. Elle devrait être plus grande à l'extérieur tu dis / maintenant ce que tu dis c'est cela
- D6 Oui
- I. Et qu'entends-tu par / la pression exercée par l'eau? / dans quel sens ?
- D7 Hum..? // plus une personne va en profondeur plus l'on dit qu'elle subit de la pression / parce que / la force exercée par l'eau devient toujours plus grande / par rapport au corps
- I. Oui, pourquoi devient-elle plus importante à mesure que l'on va vers le fond
- D8 Eh bien parce qu'il n'y a pas...hum / c'est à dire qu'il n'y a plus d'équilibre entre les forces je pense
- I. alors que dans la grotte ?
- D9 Alors que dans la grotte il y a de toute façon la présence de la roche qui est un élément que l'on trouve aussi à l'extérieur / en surface / et donc le poisson est protégé / parce s'il va au fond de la grotte il atteint une sorte d'abri
- I. Et si la grotte était plus grande ? la pression que ressent le poisson augmenterait ?
- D10 Oui elle augmenterait / et elle ressemblerait de plus en plus à celle qui est exercée sur celui à l'extérieur de la grotte
- I. Et quand on dit grande le plus important c'est qu'elle soit longue ou haute ?
- D11 Haute
- I. Si elle est longue ça ne change rien / disons à la situation / c'est la hauteur qui
- D12 oui c'est la hauteur
- I. Plus haute comme ça en fait / et s'il se déplace en direction de la roche la pression qu'il éprouve change ou bien est elle toujours égale ?
- D13 hum toujours égale
- I. Même s'il va vers la partie haute de la roche ou vers la partie basse
- D14 Non s'il va plus vers le haut elle est moindre / elle diminue |- et s'il va vers le bas <I> -|

- elle augmente
- I. Et s'il va vers la droite, s'il va vers le bord ?
- D15 Sur les bords / s'il se déplace toujours de façon horizontale / je crois que ça reste égale
- I. Et s'il va vers la sortie de la grotte ?
- D16 Elle augmente / elle augmente parce qu'il se retrouve alors près de la zone extérieure dans laquelle la pression est plus forte
- I. S'il va vers la sortie elle augmente donc s'il va de l'autre côté | - elle diminue <D> - | elle diminue
- D Eh oui
- I. Mais alors il y a un contraste tout de même entre l'idée des plongeurs et cette explication | -oui c'est vrai - <D> - | c'est vrai ! comment pourrais-tu le résoudre ? en faveur des plongeurs ou de ce raisonnement ? ou tu restes indécise ?
- D17 Eh bien vu que les plongeurs ont tout un tas d'équipements ! / que je ne connais pas / peut être que même s'ils sont soumis à des changements de pression / ils doivent juste contrôler leurs appareils | - il ne leur arrive rien en fait -<I> - | non ils ont simplement à vérifier les mesures sur leurs appareils lors qu'ils passent d'un endroit à un autre | - tu pense <I> qu'il doit exister ce genre de système - | oui , oui maintenant j'opte plus pour le raisonnement avec les petits poissons
- I. c'est parce que cette eau ici, est comme enfermée à l'intérieur disons / Bon alors maintenant je vais te poser une autre question / elle concerne la pression ici dans cette pièce / Si tu mesure la pression dans cette pièce et que tu le fait aussi à l'extérieur à l'air libre, tu trouves la même valeur ou une valeur différente ?
- D18 la même parce qu'on est sur la terre | - on est sur la terre <I> bon - | et s'il y avait un changement de pression / on le sentirait | - c'est à dire comment ? <I> - | on aurait des réactions physiques / on aurait mal à la tête / on se sentirait mal / on aurait les oreilles qui sifflent et puis / et donc je ne crois pas qu'elle varie / enfin ça c'est une question / ça varie la sensation du poids ?
- I. Ah ça je ne sais pas qu'est ce que tu en penses ?
- D19 Je crois que si / comme sur la lune / où il n'y a pas la même pression | - c'est-à-dire ? <I> - | il n'y a pas la même pression et donc pas la même impression d'apesanteur
- I. C'est différent parce qu'il n'y a pas la même pression ? Elle est plus grande, plus faible, comment est elle ?
- D20 Elle est plus grande
- I. Sur la lune elle est plus grande ? la pression
- D21 je pense
- I. Et donc ?
- D22 Et donc on a plus de mal à marcher NON!!! / elle est plus faible (rire) ils ont beaucoup moins de mal à marcher les astronautes
- I. La pression sur la lune...
- D23 C'est certain vu que...
- I. Et y a-t-il de l'air sur la lune ?
- D24 Non
- I. Tu dis donc que quelqu'un sentirait des sensations différentes en sortant de cette pièce s'il y avait une pression différente / du genre mal à la tête etc.. | - s'il y avait un changement de pression... <D> oui - | ou bien un poids plus grand ou plus faible, mais en somme cela devrait être disons très faible / si changement il y a
- D25 Oui de toute façon je ne pense pas qu'elle change vu en plus que l'on est au même niveau / on est au niveau de la mer que l'on soit à l'intérieur ou à l'extérieur
- I. Et ici le fait que l'air soit enfermé / alors / ou si au contraire on ouvre cela n'a pas

d'influence.

D26 Non

I. Très bien / Maintenant entre les deux situation proposées / celle des petits poissons et celle de cette pièce / y a-t-il une ressemblance ou une certaine analogie ? qu'est-ce que tu en penses ?

D27 Et justement ! / on voit ce petit poisson qui est à l'extérieur et cet autre à l'intérieur / donc ça pourrait de ce fait être comme quelqu'un qui est à l'intérieur ou à l'extérieur d'une pièce / mais / mais...

I. Tu y as pensé maintenant ou lorsque je t'ai posé la question ?

D28 Non j'y ai pensé maintenant

I. Et donc

D29 C'est à dire qu'à mon avis il y a le fait que l'eau rentre / je ne crois pas que l'on puisse mettre l'eau à la place de l'air | - mettre à la place <I> c'est à dire ? - | c'est à dire nous respirons de l'air et eux ils respirent de l'eau / bon enfin...(rire) / et je pense qu'il n'y a pas d'analogie en ce qui concerne la pression

I. Elle est différente / là elles sont différente (en montrant le schéma) et ici, (en montrant l'espace de la pièce) c'est la même chose, mais les deux situations ne pourraient-elles pas être similaires ? ici on serait comme dans une grotte / à la place de l'eau il y a l'air / comme si on était au fond d'une mer d'air

D30 Si l'on était au fond.. / il y aurait... / et bien si c'est ça je me suis trompée tout à l'heure | - pourquoi ? <I> - | ce que j'ai dit à propos des petits poissons...

I. Pourquoi ?

D31 Si il n'y a pas / s'ils sont au même niveau / si en restant au même niveau nous ne ressentons pas le changement de pression / pour eux c'est pareil / bien qu'il en ait un à l'extérieur et l'autre enfermé / il ne devrait pas... / il n'y a pas de changement / toujours s'il y a une analogie entre les deux

I. Tu pense qu'il y en a une ou non ?

D32 Moi au début j'ai pensé que non / vu qu'ici (en montrant le schéma) il y a de l'eau

I. Qu'a-t-elle de différent l'eau ? en somme ici il y a de l'air et là de l'eau, tu penses donc que malgré la similitude ce qui importe c'est surtout ce qu'il y a de différent et donc le résultat n'est pas le même

D33 Oui parce que l'élément naturel est différent

I. Mais on pourrait encore faire une autre objection: le fait qu'ici il y ait une pression plus grande (en désignant la pleine mer sur le schéma) et là plus faible (indiquant la grotte) n'entraînerait-il pas le fait que l'eau tende à entrer dans la grotte ?

D34 Eh oui !

I. Et donc en poussant ça devrait à un certain moment / comment pourrait on dire / la remplir encore plus / il devrait se créer un courant...

D35 Oui j'étais justement en train d'y penser / mais / mais.. (rire) / et non mais c'est que chaque fois les objections sont fondées / de toute façon la réponse c'est oui

I. C'est certain que les deux hypothèses pourrait être fondées / au fond il y a des éléments qui te font penser d'une certaine manière puis d'autres qui font changer ton raisonnement

D36 Eh oui

I. En premier il y a l'exemple des plongeurs qui te fait penser que la pression est égale / puis en second lieu il y a la question de l'eau libre ou enfermée qui te pousse à penser qu'elle est différente / et puis maintenant il y a cette dernière objection

D37 En tout cas / oui / en se remplissant.../ si c'est juste / on le voit aussi en biologie / | - en biologie c'est à dire <I> - | quand il y a deux récipients un avec moins d'eau que l'autre

et qu'ils communiquent / l'eau tend à se répartir en passant par l'espace de séparation / et donc il y a une pression qui tend à s'exercer par exemple de la gauche vers la droite / si la partie droite au début est celle où il y avait le moins d'eau | - et l'eau passe <I> - | elle passe jusqu'à ce qu'elle soit au même niveau dans les deux récipients

I. Cela s'annule

D38 Oui cela s'annule

I. Et là ?

D39 C'est la même chose / hum / et c'est égale / parce que ... / pardon... / excusez-moi / mais si elle était plus grande par là / si elle était plus grande dans la partie fermée / ce serait un courant qui irait de l'intérieur vers l'extérieur et le poisson ne pourrait pas rester à l'intérieur parce qu'il y aurait trop de courant / et il aurait du mal pauvre petit poisson...(rire) / à rester à l'intérieur / il devrait lutter contre le courant

I. Oui

D40 C'est la même chose dans l'autre sens / l'autre petit poisson (montrant celui qui est en pleine mer) / il serait attiré vers l'intérieur s'il y avait une pression plus grande à l'extérieur

I. mais tout de même celui là a plus d'eau au dessus de lui...

D41 Alors l'eau ne rentre pas en ligne de compte

I. Ok ça va / je vais te poser une autre question: on a ici un ballon qui est gonflé et rond / si on le met sous l'eau dans une piscine à une profondeur de quelques mètres se déforme-t-il et de quelle façon? quelle forme va-t-il prendre?

D42 Ce problème je le connais déjà

I. Tu l'a déjà vu

D43 Oui / je crois que c'est la réponse D

I. Pourquoi?

D44 Parce que le ballon est rempli d'air / et donc s'il va au fond il a tendance à... / tous les objets que l'on met sous l'eau ne changent pas forcément de forme / mais ici comme il est rempli d'air la pression qui s'exerce sur cet air qui est à l'intérieur / lutte en un certain sens avec l'eau qui tend à l'écraser / ou à le comprimer / et lui justement comme il est rempli d'air il maintient sa forme

I. Il se maintient dans la même forme mais garde-t-il aussi les mêmes dimensions ou devient-il plus grand, parce qu'ici dans la figure D il est plus grand

D45 Ah il est plus grand !

I. Celui-ci est plus grand / celui-ci est plus petit et celui-là est égal

D46 Ah j'aurais pu prendre celui-là (semble dire j'ai confondu)

I. Oui c'est vrai qu'ils se confondent un peu / mais bon le problème reste le même / ou bien il est plus grand / plus petit / le même / et ici il change de forme

D47 Normalement il devrait rester le même / mais vu que les réponses sont A B C ou D | - ah c'est comme ça (rire) toi, tu veux qu'il reste égal <I> - | alors ce serait plutôt A

I. Ce serait plutôt A c'est ce que tu dis / pourquoi ?

D48 Parce que le ballon est écrasé par le dessus / et donc il s'élargit sur les côtés / parce que l'eau exerce une pression vers le bas / et donc il devrait s'élargir sur les côtés gauche et droit

I. Bon mais au début tu disais / tu es encore une fois passée d'une idée à une autre eh! alors ça pourrait tout aussi bien être ta première idée

D49 Eh non!

I. Qu'est ce qui s'est passé ? parce qu'au début tu as dit qu'il devait garder la même forme

D,50 Eh oui | - alors (rire) <I> - | oui selon moi il devrait bien garder la même forme mais...

I. Et bien donc c'est plutôt non, bon (rire) si j'ai bien compris par forme tu veux dire le

- même volume
- D51 Oui
- I. Parce que tu expliques que la pression à l'intérieur lutte contre celle à l'extérieur et à la fin ça reste pareil
- D52 (long silence) Ou c'est du lard ou c'est du cochon / (rire)
- I. A ton avis il faudrait faire le test
- D53 Bon ou bien il reste pareil ou bien c'est l'autre solution / c'est 50/50
- I. Il reste pareil ou bien ?
- D54 Il est comprimé
- I. Tu exclues les autres possibilités / disons qu'il devienne plus gros ou plus petit
- D55 Mais il s'agit du ballon ou de la façon dont on le voit ?
- I. Non il ne s'agit pas de son apparence, ni de phénomènes optiques / ah bon maintenant je comprends ce que tu voulais dire / Bon ça va il me semble que tu en as dit assez / maintenant je vais te poser une dernière question rapidement / Ici tu as un tube en U / là il y a de l'eau ici au milieu c'est séparé par une cloison et là tu as un autre liquide qui a un autre poids volumique plus important que l'eau / que se passe-t-il si l'on débloque la cloison ? elle va bouger ou non ? et si elle bouge elle va vers la gauche ou vers la droite ?
- D56 Vers la droite / non vers la gauche .../ le niveau.../ mais là ça se déplace ou ça s'évacue?
- I. Ca se déplace
- D57 Oui donc à mon avis elle se déplace vers la gauche / vers la partie où il y a le moins de densité / vers là où il y a de l'eau / jusqu'à ce que le niveau soit le même à droite et à gauche / entre le liquide plus dense et l'eau / jusqu'à ce qu'il y ait un équilibre parfait des deux côtés
- I. Comment cela est-il possible ? s'il y a un déplacement vers la gauche la différence de niveau augmente / si elle se déplace par là celui-ci monte et celui-là descend
- D58 Mais / c'est à dire que les deux liquides ne se mélangent pas ?
- I. Non ils ne se mélangent pas
- D59 Ah s'ils ne peuvent pas se mélanger / il s'agit seulement d'un mouvement / alors ils se déplacent vers la droite / parce que même si l'eau est moins dense il y en a une plus grande quantité que de l'autre liquide / et donc la pression exercée par l'eau est plus grande / et cela se déplace vers la droite
- I. Jusqu'à quel point ?
- D60 Jusqu'à ce que l'eau / jusqu'au point où la pression de l'eau aura établi un équilibre avec la pression de l'autre
- I. Et à quel moment sont-ils en équilibre ? Lorsqu'ils ont la même hauteur ou bien comment...
- D61 Non ce n'est pas forcément en rapport avec la hauteur / mais lorsque la pression est équivalente entre les deux
- I. Et s'il y avait moins d'eau ? Tu as bien dit qu'ils se déplacent vers la droite parce qu'il y a plus d'eau / qu'entends-tu par plus d'eau ? comment tu la mesures ? d'après la hauteur ? Et s'il y avait un peu moins d'eau cela se déplacerait-il toujours vers la droite
- D62 Oui je crois que oui
- I. Donc toujours vers la droite / au fond ça dépend à ton avis de la quantité de liquide qu'il y a / plus il y en a...
- D63 S'il y avait moins d'eau que de produit / ce serait l'inverse et le déplacement se ferait vers la gauche.
- I. C'est bon cela suffit.

Chapitre 5. ETUDE DES RAISONNEMENTS : LES QUESTIONNAIRES

5.1 La définition des questionnaires

Sur la base des indications données par les recherches précédentes (cf. chapitre 2), de l'analyse de contenu et des idées illustrées au chapitre 3, des résultats des entretiens (chapitre 4), de quelques premières passations exploratoires de questionnaires d'essai, j'ai élaboré des questionnaires papier-crayon pour étudier les raisonnements des élèves et des étudiants concernant les fluides.

Ces premières investigations ont conduit à formuler quelques hypothèses assez détaillées sur les difficultés des élèves et des étudiants et sur les raisonnements principaux liés à ces difficultés. Je retiens surtout les aspects suivants :

- 1) La présence de la gravité influe fortement sur l'image de la situation physique, elle réveille certaines conceptions spontanées liées à l'expérience quotidienne, concentre l'attention sur les actions verticales, sur le poids qui agit vers le bas et la nécessité de soutenir ce qu'il y a au-dessus.
- 2) Pour un fluide en présence de gravité, les textes scolaires et l'enseignement insistent sur le fait que les variations de pression avec la profondeur ou l'altitude sont dues au poids, à la gravité. Cette insistance, couplée aux conceptions préexistantes chez les étudiants, engendre l'idée que la pression dans un fluide en présence de la gravité n'est qu'un effet du poids, est égale au poids du fluide qui est directement au-dessus (divisé par l'aire d'une surface considérée), et enfin qu'elle est le poids divisé par l'aire.
- 3) Il manque souvent une connexion entre une description globale et formelle de la situation, basée sur des règles et des formules ou sur la considération du fluide comme un tout, et une description locale, basée sur les forces et les interactions entre les petites parties du fluide, les changements de l'état interne des parties du fluide, avec une transmission de proche en proche de ces changements et de ces interactions.
- 4) Cette coupure entre description globale et locale se manifeste fortement dans le cas de la poussée d'Archimède, qui apparaît très souvent comme une force spéciale, à l'origine non définie, sans lien avec les différences de pression du fluide autour de l'objet solide immergé. La règle bien connue et mythique du "poids du fluide déplacé" est une formule intégrale, dont les origines différentielles sont oubliées ou non connues.
- 5) L'affirmation, souvent répétée dans les textes ou dans l'enseignement, que les liquides sont incompressibles, au contraire des gaz, crée des difficultés dans la compréhension des modifications intervenues dans un liquide. Par exemple, il est impossible de comprendre la propagation des ondes élastiques dans les liquides, sans considérer qu'ils sont compressibles. Le mot même peut créer des équivoques, étant donné qu'il est construit sur les mots "presser", "pression", mais qu'il fait référence à la possibilité de diminuer le volume.




Pour tester la part du poids dans les raisonnements des étudiants et la connexion entre les descriptions locale et globale (aspects 1, 2 et 3 décrits ci-dessus), il fallait proposer des questions dans lesquelles l'idée du "poids du fluide au-dessus" pouvait être mise dans une situation critique, suggérant une solution contradictoire avec la réponse correcte, par exemple avec des colonnes de fluide de hauteur inégale, au-dessus de différents points.

Pour faire cela j'ai proposé :

- Un récipient à la forme irrégulière, comme dans la figure 3, dans la question 4 du questionnaire "Récipients".
- Une grotte sous-marine, en communication avec la pleine mer par une ouverture, assez grande pour faire bien comprendre que l'eau peut circuler librement entre l'intérieur et l'extérieur de la grotte, mais aussi assez petite pour donner la sensation de la grotte comme un endroit protégé et bien limité. Cela aussi parce que l'idée d'un lieu fermé, étroit, avec des parois assez proches, peut engendrer des raisonnements différents, fondés sur l'action supposée des parois ou sur l'image d'un fluide coincé dans un petit espace. Il s'agit, en outre, d'une situation moins schématisée et abstraite que la précédente, du récipient à la forme irrégulière. Cette situation de la grotte a été proposée dans le questionnaire "Poissons" (voir fig.1).
- Une chambre, avec les fenêtres fermées, dans le questionnaire "Chambre". Cette situation a une forte similitude avec celle de la grotte sous-marine : le but est aussi de tester si les élèves perçoivent cette similitude et s'ils traitent les cas des liquides et des gaz de la même façon ou de façon différente.

Dans ces trois situations, on demande toujours de comparer la pression en deux points différents, à la même profondeur, pour lesquels la pression est la même.

Pour tester encore ces mêmes conceptions et difficultés, mais en termes de forces plutôt que de pression, j'ai proposé les questions 1, 2, 3 du questionnaire "Récipients".

Dans la question 1, on demande de comparer les forces exercées par l'eau sur le fond de trois récipients de forme différente, remplis d'eau jusqu'au même niveau (fig.2). Les récipients, l'un cylindrique , un autre plus large vers le bas , un autre plus large vers le haut , contiennent des quantités d'eau différentes, ce qui peut suggérer que les forces sur le fond pourraient être différentes, selon l'idée "plus de poids, donc plus de force en bas", ou bien qui peut activer d'autres raisonnements, liés à la forme des récipients ou à une éventuelle connexion entre la pression et la force.

Les questions 2 et 3 visent elles aussi à étudier un phénomène déjà constaté dans des observations préliminaires en classe et dans les entretiens : le fait que souvent, en situation statique, on oublie la pression de l'air. Il peut alors arriver que l'on considère comme agissant sur le fond du récipient seulement la force $F = \Delta p \cdot S$, Δp étant la différence de pression entre la surface libre et le fond. Cette idée mène aussi à conclure que, pour un récipient cylindrique, la force totale que le liquide exerce sur le fond du récipient est égale au poids.

Dans la question 2, on demande si la force exercée par l'eau sur le fond d'un récipient cylindrique plein d'eau change lorsque la pression atmosphérique diminue. Dans la question 3, on demande si cette force est égale, plus grande ou plus petite que le poids de l'eau dans le récipient.

Les conceptions concernant les forces de pression dans un fluide en présence de la gravité, l'interprétation de la poussée d'Archimède et la connexion entre raisonnements global et local font l'objet des questionnaires "Ballons dans l'eau" et "Ballon dans l'air", avec deux questions. Les situations sont très simples : un ballon de foot est tenu immergé dans l'eau, dans le premier cas, un ballon de foire est tenu par une ficelle, dans le second cas.

Dans la première question, on demande si l'eau ou l'air exercent des forces sur chacun de quatre disques dessinés en haut, en bas, et sur les côtés des ballons, et on demande de comparer ces forces éventuelles entre elles.

Dans la question 2, on demande si ces forces ont quelque chose à voir avec la poussée d'Archimède.

Sont en cause ici les idées sur la nature et l'origine de la poussée d'Archimède et la connexion entre les forces locales agissant sur les parties de la surface des ballons et l'effet global résumé par l'interaction d'Archimède. La proposition de deux questionnaires similaires pour l'eau et pour l'air a pour but de vérifier éventuelles similitudes et différence de traitement des deux cas.

Le problème de l'incompressibilité ou de la compressibilité des fluides est abordé par le questionnaire "Seringue pleine d'eau", où l'on considère une seringue remplie d'eau et fermée à son orifice. On demande si, en poussant fort sur le piston, la pression et le volume changent ou restent inchangés. Les mêmes questions ont été posées aussi pour une seringue avec seulement de l'air dedans. Avec ces questionnaires, je veux vérifier si les élèves et les étudiants envisagent ou non une compressibilité, même petite, de l'eau et avec quels types de justifications. Je veux aussi vérifier les différences de traitement pour les liquides et les gaz.

Le choix de la population est lié à l'objectif d'étudier les conceptions aussi chez des jeunes ayant un niveau scolaire plus avancé que celui des recherches menées par d'autres auteurs.

Le groupe en étude est formé au total de 229 élèves de secondaire, italiens et français, de 14 à 18 ans et de 458 étudiants belges de première année d'une filière scientifique.

Le nombre d'élèves et d'étudiants interrogés sur chaque question change selon les questionnaires et les questions posées.

Les étudiants universitaires ont reçu le questionnaire après avoir suivi la partie du cours théorique de physique concernant la statique des fluides.

Les élèves de secondaire interrogés peuvent être divisés en deux groupes : celui que j'appellerai des "plus jeunes" (niveaux troisième et début seconde, âge 14-15 ans) n'avait pas étudié le sujet dans un cours de physique, mais seulement dans un cours de sciences intégrées au collège, celui des "plus grands" (âge 15-18) avait suivi un cours de physique de lycée (italien ou français), avec quelques éléments de la statique des fluides, le plus souvent traitée toutefois de façon très superficielle et rapide.

Les questionnaires proposés, dont les textes sont en annexe, sont les suivants.

"Poissons" : 229 élèves de secondaire (question 1), 214 étudiants pour la question 1, 168 pour les questions 2 et 3.

"Chambre" : 229 élèves, 46 étudiants.

"Récipients" : 141 élèves de secondaire pour la seule question 1, 458, 148, 45, 411 étudiants, respectivement pour les questions 1, 2, 3, 4.

"Interactions" : 46 étudiants et 23 enseignants.

"Seringue pleine d'eau" : 214 étudiants et 29 élèves de seconde.

"Seringue avec de l'air" : 44 étudiants et 29 élèves de seconde.

"Ballon dans l'eau" : 207 étudiants pour la question 1 et 160 étudiants pour la question 2.

"Ballon dans l'air" : 42 étudiants.

5.2 La loi de l'hydrostatique : la formule et le mécanisme

5.2.1 La pression dans une chambre et dans une grotte sous-marine

Pour étudier l'évolution de conceptions concernant la pression dans les liquides et les différences possibles entre l'eau et l'air, nous avons utilisé deux questionnaires intitulés "Poissons" et "Chambre".

Le but principal est de voir comment les élèves et les étudiants envisagent l'action de l'air et de l'eau et quels facteurs physiques sont censés influencer la pression.

Les deux situations proposées dans ces deux questionnaires présentent une forte analogie (grotte et chambre). Nous voulons aussi vérifier si cette analogie est prise en compte par les élèves et si les raisonnements activés sont du même type pour l'air et pour l'eau.

Dans la question 1 du questionnaire "Poissons" (fig.1), nous avons demandé de déterminer si la pression est égale pour les deux poissons à la même profondeur, ou si elle est plus grande pour le poisson dans la grotte sous-marine, ou pour celui qui est en pleine mer. Cette question (voir aussi Besson 1990) est reprise d'un manuel italien pour le lycée (Pugliese 1984) ; une question similaire a été utilisée dans une recherche par Kariotoglou & Psillos (1993).

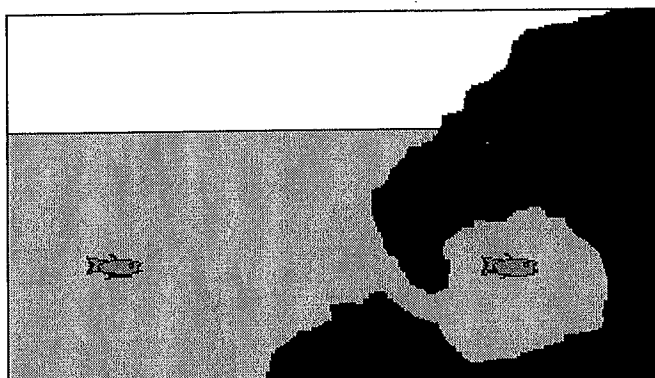


Fig. 1 Les deux poissons

Dans le questionnaire "Chambre", nous avons demandé de comparer la pression à l'intérieur et à l'extérieur d'une pièce.

Les résultats pour les élèves de lycée sont donnés dans les tableaux 1a, 1b, 1c ci-dessous.

Le tableau 1a concerne la totalité des élèves consultés.

Les tableaux 1b et 1c se réfèrent aux deux groupes définis au paragraphe 5.1, celui des élèves "plus jeunes" et celui des "plus grands".

| Tableau 1a. Résultats des questionnaires "Poissons" et "Chambre". 229 élèves de secondaire, âge 14-18 | | | | | | | |
|---|----------------|-----|------------------------------------|-----|------------------------------------|-----|-------|
| | Pression égale | | Pression plus grande à l'intérieur | | Pression plus grande à l'extérieur | | Total |
| Poissons | 45 | 20% | 102 | 45% | 82 | 36% | 229 |
| Chambre | 65 | 28% | 118 | 52% | 44 | 19% | 229 |

| Tableau 1b. Résultats des questionnaires "Poissons" et "Chambre". 96 élèves de secondaire, groupe des "plus jeunes", âge 14-15 ans | | | | | | | |
|--|----------------|-----|------------------------------------|-----|------------------------------------|-----|-------|
| | Pression égale | | Pression plus grande à l'intérieur | | Pression plus grande à l'extérieur | | Total |
| Poissons | 8 | 8% | 54 | 56% | 34 | 35% | 96 |
| Chambre | 21 | 22% | 57 | 59% | 18 | 19% | 96 |

| Tableau 1c. Résultats des questionnaires "Poissons" et "Chambre". 133 élèves italiens et français de lycée, groupe des "plus grands", âge 16-18 ans | | | | | | | |
|---|----------------|-----|------------------------------------|-----|------------------------------------|-----|-------|
| | Pression égale | | Pression plus grande à l'intérieur | | Pression plus grande à l'extérieur | | Total |
| Poissons | 37 | 28% | 48 | 36% | 48 | 36% | 133 |
| Chambre | 44 | 33% | 61 | 46% | 28 | 21% | 133 |

La grande majorité des élèves considère qu'il y a une pression différente aux deux points considérés. Dans la situation des poissons, ils se partagent presque par moitié entre les deux possibilités, pression plus grande en pleine mer ou dans la grotte (avec un léger avantage pour cette dernière réponse, avantage qui disparaît chez les élèves plus grands). Dans la situation de l'atmosphère, au contraire, il y a une préférence nette (52%) pour une pression plus grande dans la chambre.

Un peu plus de la moitié des élèves répond aux deux questions de façon différente. Parmi ceux qui donnent la même réponse aux deux questions, un peu moins de la moitié relève explicitement l'analogie entre les deux situations, analogie ressentie plus souvent par les élèves plus jeunes, surtout parmi ceux qui donnent la réponse "pression plus grande à l'intérieur". Il semble que le passage aux explications en termes de hauteur ou profondeur et de "colonne de fluide au-dessus", qu'on observe chez les élèves plus grands, se réalise de façon différente pour les deux situations de la mer et de l'air.

Les justifications le plus fréquemment utilisées sont :

- la pression dépend de la profondeur ;
- la pression dépend de la quantité d'eau au-dessus ou du poids de l'eau au-dessus ;
- la pression est plus grande dans un lieu clos, parce que l'air ou l'eau y sont enfermés, ils ont moins d'espace.

Les catégories a) et b) appartiennent à la même famille, celle de l'idée que ce qui provoque la pression est le fluide au-dessus. Il y a toutefois des nuances importantes. Ceux qui mentionnent la profondeur, le font surtout pour l'eau et souvent de façon incorrecte, parce qu'ils considèrent la hauteur de l'eau mesurée directement sur la verticale, donc jusqu'au rocher dans la grotte. Les justifications du type b) soulignent souvent un rôle "actif", dynamique, du fluide, qui pousse, "*a de la force*", "*exerce son poids*". Cette dernière catégorie semble bien appartenir à la conception du *fluide sur la tête*, selon laquelle ce qui fait la pression c'est *le poids, qui agit verticalement vers le bas*.

La catégorie c) est plus souvent utilisée pour l'air que pour l'eau. Dans certains cas, le raisonnement se focalise sur le seul fluide et sur *l'opposition fermé/ouvert* ou plus d'espace/moins d'espace. La pression est plus grande dans un lieu clos, parce que l'air ou l'eau y sont enfermés, et ont moins d'espace, tandis que dans un lieu ouvert la pression est plus petite, parce que l'air ou l'eau sont plus libres, ils peuvent bouger librement. Dans d'autres cas, les élèves font référence à un rôle actif des parois, qui *compriment, entravent* le fluide.

Quelques extraits de justifications illustrent bien ces idées :

« Dans un endroit plus petit, l'eau est plus comprimée. »

« A l'extérieur, l'air est plus libre, il y a moins de pression. »

« Dans la grotte l'eau est plus concentrée dans un endroit, plus compact. »

« Les murs de la salle compriment l'air. »

Les raisonnements de cette catégorie pourraient en bonne partie rentrer dans la conception de la pression comme tassement, mais pour les cas qui font appel seulement à l'idée d'espace clos ou ouvert, d'air libre ou enfermé, cette identification ne semble pas sûre. On pourrait aussi envisager une conception différente, plus anthropomorphique ou psychologique, selon laquelle dans un lieu clos, on se sent comprimé, *opprimé*, tandis qu'en plein air on est libre, on peut courir, il n'y a pas d'obstacle, ni de contraintes.

Cette catégorie est la plus fréquente aux niveaux scolaires les plus bas et tend à diminuer d'importance avec l'âge (pour la grotte, de 56% à 36% et pour la chambre de 59% à 46%, en passant du groupe des plus jeunes à celui des plus grands). Elle est aussi moins fréquente chez les groupes d'élèves de secondaire des filières scientifiques, que chez les élèves des filières non scientifiques, de même classe et du même établissement, (38% contre 56% pour la grotte, 40% contre 61% pour la chambre). Il semble donc un symptôme d'un raisonnement physique assez élémentaire et peu évolué.

Certains élèves ont essayé d'appliquer la formule de définition usuelle de la pression $p=F/S$, mais ils l'ont fait d'une façon non pertinente, en tirant des conclusions non correctes, par exemple "*dans la grotte l'aire de la surface est plus petite et donc la pression est plus grande*". Le même raisonnement est fait pour la chambre.

Parfois cette justification est ajoutée à une autre, du type *a* ou *b*, ce qui montre que cette référence à la formule étudiée est probablement plutôt artificielle pour l'élève ; il raisonne avec d'autres conceptions, et lorsqu'il se souvient de l'acquis scolaire, il n'arrive pas à bien l'utiliser.

Les résultats pour les étudiants de première année universitaire sont donnés dans le tableau 2 ci-dessous.

| Tableau 2. Questionnaires "Poissons" et "Chambre". 214 et 46 étudiants Comparer la pression à l'extérieur et à l'intérieur d'une grotte ou d'une chambre | | | | | | | | |
|--|----------------|-----|------------------------------------|----|------------------------------------|-----|----|-------|
| | Pression égale | | Pression plus grande à l'intérieur | | Pression plus grande à l'extérieur | | NR | Total |
| Poissons | 142 | 66% | 17 | 8% | 54 | 25% | 1 | 214 |
| Chambre | 39 | 85% | 2 | 4% | 4 | 9% | 1 | 46 |

On constate une évolution claire si l'on compare ces résultats à ceux des élèves : les réponses correctes deviennent nettement majoritaires, surtout dans le cas de l'air, et la conception selon laquelle dans un espace plus petit et clos la pression est plus grande ne se retrouve que chez une petite minorité (8% et 4%).

Dans le cas de l'air, presque tous les étudiants répondent que la pression est la même.

Dans le cas de l'eau, pourtant, un tiers d'étudiants, même après enseignement, considère encore que la pression est différente pour les deux poissons, avec une forte préférence pour la pression plus grande en pleine mer, 25%.

Ce résultat confirme la forte persistance du raisonnement fondé sur *le poids du fluide au-dessus*. Quelques justifications montrent toute la difficulté de certains étudiants qui cherchent à appliquer les notions apprises sur la profondeur et la colonne du fluide au-dessus.

« Il est vrai qu'ils sont à la même profondeur, dès lors ils devraient supporter la même pression. Cependant, l'eau qui se trouve au-dessus du poisson dans la mer est une masse plus importante que la masse d'eau qui se trouve au-dessus du poisson dans la grotte. Dans la mer le poisson supporte donc une plus grosse pression que l'autre poisson » (9C51).

Les justifications le plus utilisées sont du même type que celles qui ont été indiquées pour les élèves, mais beaucoup plus présente est la référence à la loi de l'hydrostatique, avec la formule $\Delta p = -\rho g \Delta h$ ou dans la forme verbale "même hauteur ou profondeur, donc même pression".

Quelques étudiants écrivent que la pression serait plus grande en pleine mer parce qu'en pleine mer il y a aussi la pression atmosphérique, qui n'agit pas dans la grotte.

« Malgré que ces poissons se trouvent à la même hauteur, le poids de la colonne d'eau n'est pas le même. En plus en pleine mer il y a la pression de l'air. » (9C35)

5.2.2 Les forces entre l'eau et le rocher.

Lorsque le questionnaire a été proposé à un premier groupe d'étudiants, on a constaté que certains d'entre eux, qui répondaient que la pression dans la grotte était plus petite qu'en pleine mer, pensaient aussi que le rocher du plafond de la grotte n'exerçait pas une force sur l'eau, parce qu'il "tient tout seul", n'a pas besoin d'être *soutenu par l'eau* :

« Le rocher ne repose pas, ne pousse pas sur l'eau : si l'eau sèche, le rocher ne tombe pas » (9C6, 9C29).

Cette idée, que rien ne se passe au plafond de la grotte, pourrait être une des causes de la réponse fausse, selon laquelle la pression est plus petite dans la grotte.

Cette constatation suggérerait qu'il pourrait être intéressant de poser d'autres questions explicites sur cet aspect, pour mieux comprendre les raisonnements impliqués dans cette situation. Nous avons alors ajouté, dans la situation des deux poissons, pour 168 étudiants, deux questions sur les éventuelles forces agissant entre le rocher et l'eau, en bas et en haut de la grotte.

Question 2 : En bas de la grotte, l'eau exerce-t-elle une force sur le rocher et le rocher exerce-t-il une force sur l'eau ?

| Tableau 3. Questionnaire "Poissons". Question 2. 168 étudiants En bas de la grotte l'eau exerce-t-elle une force sur le rocher et le rocher exerce-t-il une force sur l'eau ? | | | | | | |
|---|-----|-----|-----|------|----|-------|
| | oui | | non | | NR | Total |
| Force de l'eau sur le rocher | 154 | 92% | 7 | 4,2% | 7 | 168 |
| Force du rocher sur l'eau | 133 | 79% | 21 | 13% | 14 | 168 |

Question 3 : En haut de la grotte, l'eau exerce-t-elle une force sur le rocher et le rocher exerce-t-il une force sur l'eau ?

| Tableau 4. Questionnaire "Poissons". Question 3. 168 étudiants En haut de la grotte l'eau exerce-t-elle une force sur le rocher et le rocher exerce-t-il une force sur l'eau ? | | | | | | |
|--|-----|-----|-----|-----|----|-------|
| | oui | | non | | NR | Total |
| Force de l'eau sur le rocher | 140 | 83% | 18 | 11% | 10 | 168 |
| Force du rocher sur l'eau | 113 | 67% | 32 | 19% | 23 | 168 |

On trouve que seulement 2 étudiants sur 3 répondent, correctement, qu'il existe une force exercée par le rocher sur l'eau en haut de la grotte et 4 sur 5 en bas de la grotte. Une minorité importante considère que le rocher n'exerce pas une force sur l'eau, surtout en haut de la grotte (19%). Le nombre très élevé de non-réponses, de la part d'étudiants qui répondent au reste du questionnaire, peut être un signe d'incertitude et de difficulté sur ces questions concernant les forces du rocher sur l'eau. Au total, un tiers des étudiants répondent que ces forces n'existent pas en haut de la grotte, ou ne se prononcent pas à ce propos. Les étudiants qui considèrent qu'il n'y a pas de force exercée par le rocher sur l'eau sont, presque tous, parmi ceux qui ne donnent pas la réponse correcte à la question 1 concernant la comparaison des pressions dans la grotte et en pleine mer.

On voit ici que s'il manque l'idée d'un *mécanisme*, à partir des actions locales, les étudiants n'arrivent pas à bien comprendre la situation physique.

Question 2. En bas de la grotte. Justifications principales.

Pour la force de l'eau sur le rocher :

Réponse "Il y a une force" :

La force est le poids de l'eau, de la colonne d'eau au-dessus (51 étudiants) :

«La force exercée par l'eau sur le rocher en bas de la grotte est égale à son poids ($mpVg$).» (0C04)

«Le poids de l'eau est exercé sur le rocher du bas et le rocher exerce une force de réaction sur l'eau.» (0C84)

«L'eau exerce une force sur le rocher du bas qui est la force newtonienne, qui équivaut à la masse de la colonne d'eau multipliée par l'accélération gravitationnelle. Le rocher exerce une force qui contre celle de l'eau.» (0C34)

La force est due à la pression, au contact avec l'eau (18 étudiants).

Il y a la force due à la pression plus le poids (4 étudiants).

Pour la force du rocher sur l'eau :

Réponse "Il y a une force" :

qui est la réaction à la force de l'eau (61 étudiants).

Réponse "Il n'y a pas de force", parce que :

«La loi de l'action-réaction ne s'applique que pour des corps solides » (9C55).

«La force que l'eau exerce sur le rocher est son poids. Le rocher n'exerce aucune force sur l'eau.» (0C03),

Question 3. En haut de la grotte. Justifications principales.

Plusieurs étudiants font une référence explicite à la question précédente, en écrivant que la réponse est la même que celle de la question 2 (20 étudiants).

Pour la force de l'eau sur le rocher :

Réponse "Il y a une force" :

La force est la poussée d'Archimède (14 étudiants).

Elle est due à la pression de l'eau qui agit dans toutes les directions (17 étudiants).

Le haut de la grotte est au-dessous du niveau de la surface libre de l'eau, l'eau veut arriver à ce niveau (12 étudiants).

«Oui. Si on imagine que, par magie, un morceau de rocher (situé sur le haut de la grotte) disparaît, instantanément l'espace vide se remplirait d'eau.» (0C02)

La force est la réaction à la force du rocher (4 étudiants).

«Oui, car le rocher a son poids, il se peut que si il n'y avait pas d'eau, il se serait effondré, donc l'eau exerce une force sur le rocher pour le retenir.» (0C10).

Réponse "Pas de force de l'eau sur le rocher", parce que :

toute la force de l'eau s'exerce vers le bas ou sur les cotés, il n'y a pas de colonne d'eau en haut (7 étudiants).

Pour la force du rocher sur l'eau :

Réponse "Il y a une force", cette force est :

la réaction à la force de l'eau (32 étudiants),

le poids du rocher (10 étudiants) :

«Oui, le rocher exerce une force sur l'eau : son poids.» (0C04)

«Le rocher possède un certain poids et donc l'exerce sur l'eau » (0C77),

«Le rocher du haut exerce une force sur l'eau (son poids) et l'eau exerce une force

de réaction sur le rocher» (9C84).

Réponse "Pas de force du rocher sur l'eau", car :

le rocher n'appuie pas sur l'eau, est attaché à la terre, son poids n'exerce aucune force, est statique.

En ce qui concerne les forces intervenant entre l'eau et le rocher, la plupart des étudiants cherchent une cause physique à l'une des deux forces et justifie la présence de l'autre en vertu de la loi des actions réciproques. Les critères pour choisir laquelle des deux forces expliquer d'abord sont fondés sur l'idée que les fluides agissent, poussent sur les corps en contact et sur l'idée que les forces liées au poids, à la gravité agissent vers le bas.

Donc, en bas de la grotte, les deux critères convergent dans le choix de la force de l'eau comme force explicative de la force du rocher et on ne trouve jamais l'inverse.

En haut de la grotte, au contraire, les deux critères sont en contraste, et en effet l'on trouve les deux cas, mais avec une préférence encore pour l'eau comme premier agent.

5.2.3 Quelques conclusions

La grande majorité des élèves considère qu'il y a une pression différente aux deux points considérés. Dans la situation des poissons, ils se partagent presque par moitié entre les deux possibilités, pression plus grande en pleine mer ou dans la grotte (avec un léger avantage pour cette dernière réponse, avantage qui disparaît chez les élèves plus grands). Dans la situation de l'atmosphère, au contraire, il y a une préférence nette (52%) pour une pression plus grande dans la chambre.

Les raisonnements les plus utilisés sont :

- a) La pression dépend de la profondeur ou de la hauteur, avec évocation de la loi de l'hydrostatique.
- b) La pression dépend de la quantité d'eau au-dessus ou du poids de l'eau au-dessus, conception du "fluide sur la tête", selon laquelle ce qui fait la pression c'est *le poids, qui agit verticalement vers le bas*.
- c) La pression est plus grande dans un lieu clos, parce que l'air ou l'eau y sont enfermés, ils ont moins d'espace, parfois avec une référence aux parois, qui *compriment, entravent* le fluide.

Cette dernière catégorie est plus présente pour l'air que pour l'eau, elle est plus fréquente aux niveaux scolaires les plus bas et tend à diminuer d'importance avec l'âge, jusqu'à devenir nettement minoritaire au début de l'université (pour la grotte et la chambre, respectivement : en secondaire, de 56% et 59% chez les plus jeunes à 36% et 46% chez les plus grands, en première année universitaire 8% et 4%). Elle est aussi moins fréquente chez les groupes d'élèves de secondaire des filières scientifiques, que chez les élèves des filières non scientifiques, de même classe et du même établissement, (38% contre 56% pour la grotte, 40% contre 61% pour la chambre). Il semble donc un symptôme d'un raisonnement physique assez élémentaire et peu évolué.

Chez les étudiants, les réponses correctes deviennent majoritaires et la conception selon laquelle dans un espace plus petit la pression est plus grande devient très rare.

Dans le cas de l'air, presque tous les étudiants répondent que la pression est la même.

Dans le cas de l'eau un tiers d'étudiants, même après enseignement, considère encore que la pression est différente pour les deux poissons, avec une forte préférence pour la pression plus grande en pleine mer (25%). D'ailleurs, la majorité des étudiants qui donnent une justification pour l'existence d'une force de l'eau sur le rocher en bas de la grotte, écrivent que cette force est égale au poids de l'eau ou est le poids de l'eau. Ces résultats confirment la forte persistance du raisonnement basé sur *le poids du fluide au-dessus*.

Une minorité importante considère que le rocher n'exerce pas une force sur l'eau en haut de la grotte (19% écrivent que cette force n'existe pas et 14% ne se prononcent pas à ce propos). Le nombre très élevé de non-réponses, de la part d'étudiants qui répondent au reste du questionnaire, est aussi un signe d'incertitude et de difficulté sur ces questions concernant les forces du rocher sur l'eau. Les étudiants qui considèrent qu'il n'y a pas de force exercée par le rocher sur l'eau sont, presque tous, parmi ceux qui ne donnent pas la réponse correcte à la question 1 concernant la comparaison des pressions dans la grotte et en pleine mer.

On voit ici que s'il manque l'idée d'un *mécanisme*, à partir des actions locales, les étudiants n'arrivent pas à bien comprendre la situation physique.

5.3 La force pressante et le poids

Pour tester le rôle du poids dans les raisonnements des étudiants et les relations entre pression et force, un autre questionnaire, «Récipients», a été proposé.

Nous avons utilisé ce questionnaire dans des versions différentes.

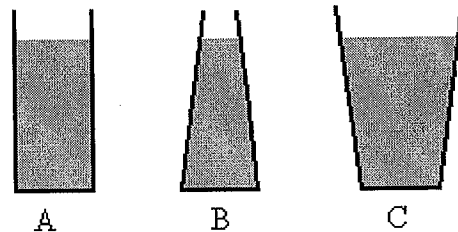
En ce qui concerne les étudiants de première année universitaire, l'échantillon le plus large (263) a répondu à un questionnaire ne comportant que les questions 1 et 4, un autre groupe assez nombreux (148) a reçu le questionnaire avec les questions 1, 2 et 4, et un dernier groupe plus petit (47) a répondu seulement aux questions 1 et 3. Pour cette raison le nombre de réponses disponibles varie beaucoup selon les questions : il est très élevé pour la question 1 (458 étudiants), un peu moindre pour la question 4 (411), beaucoup plus petit pour la question 2 (148) et surtout pour la question 3 (45).

Les élèves de secondaire (141) ont eu seulement la question 1. Le questionnaire a été passé au début d'année scolaire à des élèves des premières quatre classes de lycée italien (niveaux 9-12, âge de 14 à 17 ans). Dans la version proposée aux élèves de secondaire, une autre réponse possible a été introduite, selon laquelle "la force est égale pour les récipients a ☐ et c ☐, mais elle est plus petite pour b ☐". Cela parce que quelques étudiants consultés en précédente avaient proposé cette solution, sur la base de l'idée que les "colonnes d'eau" au-dessus du fond sont égales pour les cas a et c , tandis que, dans le cas b , elles sont plus petites vers les bords du récipient.

5.3.1 La force au fond de trois récipients de forme différente

Question 1

On demande de comparer les forces exercées par l'eau sur le fond des trois récipients de la fig.2, dont les fonds sont de même aire.



Les fonds des récipients sont égaux

Fig.2 Les trois récipients

| Tableau 5a. Résultats du questionnaire "Récipients". Question 1 141 élèves d'un lycée italien, âge 14-17 | | | | | | | | | | |
|---|-----|--------------------------------|------|--------------------------------------|-------|--------------------------------------|-----|--------------------------------------|----|-------|
| Forces égales | | Force plus grande en \square | | Force plus grande en $/_\backslash$ | | Force plus grande en $\backslash_/$ | | Force plus petite en $/_\backslash$ | | Total |
| 20 | 14% | 1 | 0,7% | 28 | 19,9% | 85 | 60% | 7 | 5% | 141 |

| Tableau 5b. Résultats du questionnaire "Récipients". Question 1 458 étudiants de première année universitaire | | | | | | | | | | |
|--|-----|--------------------------------|------|--------------------------------------|------|--------------------------------------|-----|----|-------|--|
| Forces égales | | Force plus grande en \square | | Force plus grande en $/_\backslash$ | | Force plus grande en $\backslash_/$ | | NR | Total | |
| 150 | 33% | 7 | 1,5% | 28 | 6,1% | 270 | 59% | 3 | 458 | |

La réponse, correcte, que les forces considérées sont égales est donnée par 14% des élèves et par 33% étudiants, tandis que plus de la moitié, 60% et 59% respectivement pour la secondaire et l'université, répondent que la force exercée par l'eau sur le fond du récipient est plus grande dans le cas du récipient évasé $\backslash_/$.

Les justifications confirment la présence forte de l'équivalence "plus d'eau = plus de force sur le fond", utilisant l'idée que le poids de l'eau, de toute l'eau qui est dans le récipient, agit sur le fond, qui doit la soutenir.

En passant du secondaire à l'université, on voit que les réponses correctes augmentent sensiblement (de 14% à 33%), mais le pourcentage de la réponse "plus de force dans le récipient plus large" demeure presque constant. Ce résultat confirme la persistance et la ténacité du raisonnement "plus d'eau, donc plus de force", lié à l'idée que le poids de l'eau, de toute l'eau, agit sur le fond du récipient, qui doit la soutenir.

Plusieurs étudiants donnent des justifications ambiguës ou sont indécis entre les réponses "forces égales" et "forces plus grande en _/" (ils marquent la dernière, après quoi ils effacent et changent de réponse).

Une autre typologie, minoritaire, de justifications apparaît, selon laquelle la pression de l'air provoque sur la surface libre du récipient _ / une force plus grande que dans les autres récipients. Cette force est censée se transmettre sur le fond du récipient, faisant que la force exercée par l'eau sur le fond du récipient devient plus grande dans le cas de ce récipient.

Les justifications données pour la réponse correcte "forces égales" évoquent presque toutes le fait que dans les trois récipients il y a la même hauteur ou profondeur de liquide, que la force ne dépend que de la profondeur.

La réponse indiquant une force plus grande dans le récipient plus étroit /_ \ est minoritaire, mais encore forte chez les élèves de secondaire (20%), tandis qu'elle disparaît presque chez les étudiants universitaires (6%).

Les justifications données montrent que ce type de réponse est lié à la conception selon laquelle dans un espace plus petit la pression est plus grande, l'eau est plus comprimée ou à l'idée que les parois surplombantes exercent une force supplémentaire, qui fait que la force totale soit plus grande.

« Dans le récipient plus étroit l'eau est plus comprimée. »

Dans le coin du récipient /_ \ « il y a un petit espace, donc plus de pression », « l'eau est entourée de trois parois, donc elle sera plus comprimée. »

Nous avons déjà vu, dans les questionnaires "Poissons" et "Chambre" que cette conception tend à diminuer sa présence en avançant de niveau scolaire, jusqu'à devenir très rare à l'université.

On voit que les étudiants répondent mieux au questionnaire "Poissons" (voir par.5.2), concernant la pression, pour laquelle ils ont à disposition la formule de la loi de l'hydrostatique, tandis qu'ils sont plus en difficulté sur la question concernant la force. Les acquis scolaires sur la pression sont là, mais ils demeurent souvent superficiels, et les étudiants n'arrivent pas à bien s'en servir pour articuler les différents aspects de la situation physique (pression, force, état interne, descriptions locale et globale).

5.3.2 Pression de l'air et force pressante de l'eau

Les questions 2 et 3 du questionnaire "Récipients" reviennent sur certains aspects déjà indiqués pour la question 1, mais visent surtout à étudier un phénomène que nous avons déjà constaté dans des observations préliminaires en classe et dans les entretiens : le fait que souvent, en situation statique, on oublie ou on ne considère pas la pression de l'air.

Il peut alors arriver que l'on considère comme agissant sur le fond du récipient seulement la force $F = \Delta p \cdot S$, Δp étant la différence de pression entre la surface libre et le fond. Cette idée amène aussi à conclure que, pour un récipient cylindrique, la force totale que le liquide exerce sur le fond du récipient est égale au poids (comme on dit par exemple dans l'Encyclopédie Quillet (1994), p.223).

L'erreur qu'on fait en oubliant la pression de l'air n'est pas négligeable, si l'on considère que, pour un récipient cylindrique de 1 m de hauteur rempli d'eau, la force exercée par l'eau sur le fond est d'environ 11 fois le poids de l'eau.

Un autre but de ces deux questions est de voir comment est interprétée la loi de l'hydrostatique et comment la formulation globale de cette loi s'articule avec une description locale des forces de contact entre liquide, air et récipient.

Question 2

La force exercée par l'eau sur le fond d'un récipient change-t-elle, si la pression atmosphérique diminue ?

| Tableau 6. Résultats du questionnaire "Récipients". Question 2. La force exercée par l'eau sur le fond d'un récipient change-t-elle, si la pression atmosphérique diminue ? 148 étudiants | | | | | | | |
|---|-----|---------------------------|-----|--------|------|----|-------|
| La pression change, diminue | | La pression ne change pas | | Autres | | NR | Total |
| 97 | 66% | 40 | 27% | 5 | 3,4% | 6 | 148 |

Question 2. Justifications principales

- a) Réponse du type: La force au fond du récipient change, diminue, si la pression atmosphérique diminue.

La pression atmosphérique se transmet ou s'additionne à la pression de l'eau. $p_{\text{tot}} = p_{\text{eau}} + p_{\text{air}}$.

« La pression de l'air "diffuse" à travers le liquide. » (9S07)

« La pression atmosphérique s'additionne au poids de l'eau, qui exerce cette force sur le fond du récipient. » (9S22)

«... car la pression atmosphérique exerce une force sur le récipient. Si cette force varie, l'eau pousse moins fort sur le fond du récipient. Mais la force "effective" de l'eau ne change pas» (9C75).

«La pression atmosphérique exerce une pression sur le haut du liquide et donc sur le fond du récipient» (9C68, pareil 9C70).

«La pression exercée par l'eau même sur le fond est identique, mais la pression atmosphérique s'ajoute ...» (9C61)

- b) Réponse: La force au fond du récipient ne change pas.

Les justifications sont toutes du type : ce sont le poids de l'eau, la gravité qui comptent, pas la pression atmosphérique. Par exemple :

« Seul le poids de l'eau compte » (par exemple 9S03, 9S08, 9C19),

« La force exercée par l'eau dépend seulement de g » (9S33, 9S67),

« C'est la gravité qui va faire changer la force de l'eau et pas la pression de l'air » (9S04, 9S05, 9C56),

« Ce n'est pas la p_{atm} qui agit sur le fond, mais la pression de l'eau » (9C63, 9C67, 9C16).

Plus d'un quart des étudiants (27%) pensent que la pression de l'air n'influence pas la force que l'eau exerce sur le fond du récipient, parce que ce qui compte est encore seulement le poids de l'eau, la gravité.

Dans les justifications, on trouve souvent l'idée de transmission des forces, dans la direction verticale, vers le bas.

Dans plusieurs des justifications données pour la réponse exacte apparaît l'idée que l'air

agit directement sur le fond du récipient et qu'il y a donc deux forces distinctes qui sont appliquées sur le fond du récipient, l'une exercée par l'eau et l'autre exercée par l'air au-dessus du liquide, au lieu d'une seule force, celle qui est exercée par l'eau qui est en contact avec le fond. L'intensité de cette force est en relation avec la pression de l'eau au fond du récipient, qui, à son tour, peut être mise en relation avec la pression de l'air, par la formule $p = p_{air} - \rho g \Delta h$. Dans le raisonnement de ces étudiants, cette formule, convertie en termes de forces, se transforme en une addition entre deux forces réelles, exercées par deux corps différents, pour en trouver la résultante : $p_{tot} = p_{eau} + p_{air}$ et donc $F_{tot} = F_{eau} + F_{air}$.

Il y a ici un glissement de sens de la formule. Les termes algébriques à droite de l'équation sont *matérialisés*, et l'agent de la force de pression sur le fond du récipient est en partie déplacé : ce n'est plus seulement l'eau en contact avec le fond, mais aussi l'air au-dessus de l'eau, air qui semble agir directement sur le fond même. C'est là une altération du sens physique de la formule et du concept de force, qui est bien diffusé.

C'est encore, il nous semble, un effet de l'absence d'un raisonnement local. Le besoin d'une explication causale, en ne disposant que de l'outil, formel et global, qu'est la formule de la loi de l'hydrostatique, pousse les étudiants à chercher la cause dans les termes de cette même formule (Rainson et Viennot 1998, Viennot 1996), mais ils ne peuvent y trouver qu'une explication verbale, qui occulte les forces réellement impliquées, forces de surface, agissant localement.

Question 3 (45 étudiants)

Dans un récipient cylindrique, on verse de l'eau.

La force exercée par l'eau sur le fond du récipient est-elle égale au poids de l'eau, ou bien plus grande, ou plus petite que celui-ci ?

- a) égale au poids de l'eau
- b) plus grande que le poids de l'eau
- c) plus petite que le poids de l'eau
- d) dépend de la largeur du récipient

La réponse *a* (force sur le fond égale au poids de l'eau), est donnée par 19 étudiants, soit 42%, avec des justifications du type :

"Le poids est la seule force, il n'y a pas d'autre force" (7 étudiants),

"La force est exercée par le poids de l'eau, le poids de l'eau passe au récipient, la force est le poids" (6 étudiants).

La réponse correcte *b* (force sur le fond plus grande que le poids de l'eau) est donnée par 11 étudiants, soit 24%, mais parmi eux 3 seulement évoquent la pression atmosphérique, les autres justifications faisant référence à une vitesse initiale de l'eau ou à l'augmentation de la pression avec la profondeur.

La réponse *c* (force sur le fond plus petite que le poids de l'eau) est donnée par 6 étudiants, soit 13%. L'idée de la transmission du poids est évoquée aussi ici par 3 étudiants, avec la variante que le poids ne s'exerce pas directement et entièrement sur le fond, mais aussi en partie sur les parois et que la force sur le fond est donc plus petite que le poids. Deux étudiants justifient cette réponse par la poussée d'Archimède.

5.3.3 La pression en deux points au fond d'un récipient de forme irrégulière

Dans leurs justifications et dans les entretiens, les élèves et les étudiants ont plusieurs fois exprimée l'idée selon laquelle ce qui détermine et provoque la pression dans un point d'un liquide est la quantité de liquide situé directement au-dessus du point considéré.

Cette insistance nous a amenés à vérifier cette conception, ainsi que d'autres raisonnements éventuels, en utilisant un récipient de forme irrégulière, dans lequel les hauteurs d'eau au-dessus d'un point sont différentes pour des différents points, situés sur une même ligne horizontale.

Question 4

Comparer la pression en deux points S, R dans un récipient plein d'eau.

Réponse correcte :
la pression est égale $p_S = p_R$

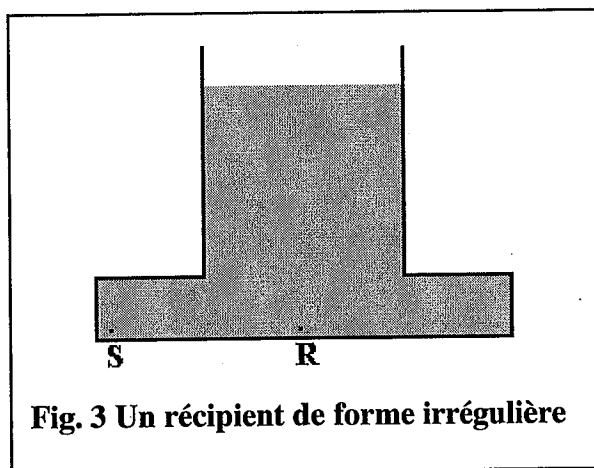


Tableau 7. Résultats du questionnaire "Récipients". Question 4
Comparer la pression en deux points S, R dans un récipient plein d'eau

| p(S)=p(R) | | p(S)>p(R) | | p(S)<p(R) | | NR | Total |
|-----------|-----|-----------|-----|-----------|-----|----|-------|
| 305 | 74% | 40 | 10% | 64 | 16% | 2 | 411 |

Une forte majorité d'étudiants répond correctement, mais il y a encore un quart qui répond que la pression est différente, avec une préférence pour la pression plus grande au point R, au-dessus duquel il y a plus d'eau.

Cette question ressemble à la question 1 du questionnaire "Poissons", les pourcentages de réponses sont assez similaires, mais on peut remarquer que les réponses correctes (pressions égales) sont plus nombreuses dans le cas du récipient que dans celui de la grotte sous-marine du questionnaire "Poissons". Il semble donc que la question sur les poissons est un peu plus difficile pour les étudiants et l'on peut s'attendre à ce que les résultats soient moins bons que ceux qui sont obtenus sur la question du récipient.

On peut supposer que la situation du récipient étant plus schématisée, il est plus naturel pour les étudiants d'y appliquer les règles apprises dans les cours de physique. En plus, le fait que la grotte soit presque fermée a peut-être une influence ; dans le récipient, les coins latéraux sont bien ouverts et il est donc plus facile de considérer que les deux points sont sur une même ligne horizontale, avec la même pression.

Question 4. Justifications principales.

- a) Réponse : La pression est la même dans les deux points.
Presque toutes les justifications font référence à l'égalité de la profondeur (ou hauteur) des deux points.
Pour quelques étudiants, la pression est la même partout, en tout point, dans un liquide en équilibre.
- b) Réponse : La pression est plus grande en R.
La plupart font encore référence à la profondeur ou hauteur, mais aussi surtout à la *colonne d'eau au-dessus*, au poids de cette colonne d'eau.
"La masse d'eau repose surtout sur la surface R" (9S23).
"En S la p_{atm} est faible et peut-être elle n'agit pas" (9C26).
- c) Réponse : La pression est plus grande en S.
Petit espace, donc plus de pression.
En S l'eau est entourée de trois parois.
Surface plus grande en R, donc pression plus petite.
« Car S subit la pression sur S plus la pression sur R » (S10).
« S subit la pression de R, mais R ne subit pas la pression de S » (C23).

5.3.4 Poids quantité et poids action

Nous avons déjà illustré, au paragraphe 3.2, la double nature de l'usage et du sens du mot *poids*, et de ses dérivations : le *poids quantité* et le *poids action*.

On a beau dire que le poids d'un objet est la force exercée par la Terre sur l'objet, dans le sens commun il est plutôt une propriété intrinsèque de l'objet et, de surcroît, une propriété *active*, une *vertu* que l'objet peut exercer sur d'autres objets.

Dans l'usage courant, même au figuré, il semble évident que le poids est considéré souvent comme une action exercée par l'objet qui pèse et non comme une action de la Terre sur lui ; et le poids est censé pouvoir se transmettre, totalement ou partiellement, aux objets proches, au-dessous. Le dictionnaire Hachette écrit : « *Peser sur* : exercer une force, une pression sur. *Cela a pesé sur ma décision. L'oisiveté lui pèse.* » D'ailleurs l'étymologie du mot est la même que celle de *pendre*, du latin "pendere".

Le langage des manuels et des enseignants peut aussi favoriser cette idée. Souvent on trouve des expressions du type "prenons un poids", "on attache un poids à ...".

D'ailleurs le *paradoxe hydrostatique* (cf. par. 3.2) est considéré comme un paradoxe parce qu'on pense que le liquide devrait transmettre, devrait "exercer" son poids sur les objets au-dessous et donc on s'émerveille qu'un liquide puisse exercer une force supérieure à son poids ou que deux quantités de liquide, ayant différent poids, puissent exercer la même force.

Les formulations usuelles de la loi de l'hydrostatique, en termes de poids de la colonne de fluide au-dessus, peuvent donner une image impropre de la situation physique et favoriser cette idée d'action ou de transmission du poids au-dessous.

Dès lors on peut mieux comprendre pourquoi beaucoup d'élèves considèrent que la pression de l'air dans une chambre est plus petite qu'à l'extérieur ou que la pression de l'eau est plus petite pour un poisson dans une grotte qu'en pleine mer, comme il apparaît dans les réponses données au questionnaire "Poissons".

Selon cette idée, la *transmission du poids* agit normalement sur les objets au-dessous.

5.3.5 Quelques conclusions

Plus de la moitié des élèves (60%) et des étudiants (59%) répondent que la force exercée par l'eau sur le fond du récipient est plus grande dans le cas du récipient évasé _/.

Les justifications confirment la présence forte de l'équivalence "plus d'eau = plus de force sur le fond", utilisant l'idée que le poids de l'eau, de toute l'eau qui est dans le récipient, agit sur le fond, qui doit la soutenir.

La réponse indiquant une force plus grande dans le récipient plus étroit /__\ est minoritaire, mais encore forte chez les élèves de secondaire (20%), tandis qu'elle disparaît presque chez les étudiants universitaires (6%). Les justifications données montrent que ce type de réponse est liée à la conception selon laquelle dans un espace plus petit la pression est plus grande, l'eau est plus compressée ou à l'idée que les parois surplombantes exercent une force supplémentaire, ce qui fait que la force totale devient plus grande.

En passant de la secondaire à l'université, on voit que les réponses correctes augmentent sensiblement (de 14% à 33%), mais le pourcentage de la réponse "plus de force dans le récipient plus large" demeure presque constant. Ce résultat confirme la persistance et la ténacité du raisonnement "plus d'eau, donc plus de force", lié à l'idée que le poids de l'eau, de toute l'eau, agit sur le fond du récipient, qui doit la soutenir.

On retrouve la confusion engendrée par la définition $\text{pression} = \text{force}/\text{aire}$ dans le cas des fluides, où, souvent, il n'est pas du tout clair de quelle force et de quelle aire l'étudiant parle.

La règle bien connue et souvent répétée de la profondeur ou de la colonne de fluide au-dessus est souvent mal interprétée par les étudiants : un quart d'entre eux (26%) répondent qu'il y a une pression différente en deux points au fond d'un récipient de forme irrégulière (question 4).

Plus d'un quart des étudiants (27%) pensent que la pression de l'air n'influence pas la force que l'eau exerce sur le fond du récipient, parce que ce qui compte est, ici encore, seulement le poids de l'eau, la gravité.

Les réponses sont plus correctes quand on demande de comparer les pressions ou les forces dans un seul récipient, que lorsqu'il s'agit de comparer deux récipients différents. Peut-être parce que, dans le premier cas, on est poussé à activer un *raisonnement local*, tandis que, dans le second cas, on peut bien se limiter à une vision globale de la situation.

La règle de la profondeur ou hauteur est mieux maîtrisée dans le cas d'un seul récipient, tandis qu'elle est plus souvent abandonnée dans le cas d'une comparaison entre des récipients différents.

Dans plusieurs justifications données pour la réponse exacte à la question 2 apparaît l'idée que l'air agit directement sur le fond du récipient, et donc qu'il y a deux forces distinctes qui sont appliquées sur le fond du récipient, l'une exercée par l'eau et l'autre exercée par l'air au-dessus du liquide, au lieu d'une seule force, celle qui est exercée par l'eau qui est en contact avec le fond. L'intensité de la force exercée par l'eau sur le fond du récipient dépend de la pression de l'eau au fond du récipient, qui, à son tour, peut être mise en relation avec la pression de l'air, par la formule $p = p_{air} + \rho gh$. Dans le raisonnement de ces étudiants, cette formule se transforme en une addition entre deux forces réelles, exercées par deux corps différents, pour en trouver la résultante : $p_{tot} = p_{air} + p_{eau}$ et donc $F_{tot} = F_{air} + F_{eau}$.

Il y a ici un glissement de sens de la formule. Les termes algébriques à droite de l'équation sont *matérialisés*, et l'agent de la force de pression sur le fond du récipient est en partie déplacé : ce n'est plus seulement l'eau en contact avec le fond, mais aussi l'air au-dessus de l'eau, air qui semble agir directement sur le fond même. C'est encore, il nous semble, un effet de l'absence d'un raisonnement local. Le besoin d'une explication causale, en ne disposant que de l'outil, formel et global, qu'est la formule de la loi de l'hydrostatique, pousse les étudiants à chercher la cause dans les termes de cette même formule, mais ils ne peuvent y trouver qu'une explication verbale, qui occulte les forces réellement impliquées, forces de surface, agissant localement.

5.4 La force pressante est le poids : causalité et identité

5.4.1 Le questionnaire "Interactions"

La forte permanence de l'explication de la pression en termes de poids au-dessus, nous a amenés à faire l'hypothèse que pour beaucoup d'étudiants il y a une identification entre la pression et le poids, comme s'il s'agissait de deux aspects de la même chose.

Pour vérifier cette hypothèse, nous avons proposé le questionnaire "Interactions" à 46 étudiants de première année universitaire et à 23 enseignants.

Dans ce questionnaire, nous leur avons demandé de préciser quel type de force (ou d'interaction) est, parmi les quatre fondamentales (gravitationnelle, électromagnétique, nucléaire forte, faible), la force qu'on ressent sur l'oreille quand on va sous l'eau, en profondeur.

Le résultat est très net et uniforme, 93% répond qu'il s'agit d'une force gravitationnelle.

Les justifications montrent le glissement de sens des descriptions évoquant l'influence de la gravité sur la valeur de la pression, vers une identification entre le poids et les forces de pression : la pression est *due* au poids, le poids *cause*, *crée* la pression, la force pressante *est* le poids, la force de gravité.

« La force est due au poids de la colonne d'eau située au-dessus »,
« La force exercée est le poids ».

En effet, dans le raisonnement commun, et même ailleurs, on fait souvent une confusion entre *cause efficiente* et *cause contingente*, entre les *conditions* de production du phénomène et la cause "vraie" (Halbwachs 1971) qui le produit, entre provoquer et produire le phénomène.

Nous avons déjà illustré ce phénomène au paragraphe 3.3.

La force de gravité, le poids, provoquent l'augmentation des forces de pression, mais ce sont les interactions entre les parties du fluide qui sont en relation directe avec la pression et ce sont les interactions entre les parties du fluide et les parois solides qui "produisent" les forces de pression, ces dernières n'étant que les résultantes au niveau macroscopique de ces interactions.

Le récipient, les parois solides sont le "support" qui empêche la chute du fluide et ils ont donc le rôle de "conditions aux limites", de cause contingente.

Mais aussi la gravité est ici, en quelque sorte, une cause contingente, une condition pour que la variation de pression se produise, tandis que ce sont les interactions locales, superficielles, qui produisent cette variation et constituent, donc, la cause efficiente.

5.4.2 Quelques conclusions

Presque tous les étudiants et les enseignants interrogés répondent que la force pressante du liquide est une force gravitationnelle, est le poids. Ce résultat très net confirme notre hypothèse que l'insistance presque exclusive, habituelle dans les cours et dans les textes, sur le rôle du poids du fluide comme *cause* de la pression hydrostatique peut engendrer l'idée que la force pressante des liquides est non seulement due au poids, est égale au poids, mais qu'elle *est le poids*, donc une force de nature gravitationnelle.

5.5 La poussée d'Archimède : description globale et raisonnement local

5.5.1 Les forces de pression sur un ballon dans l'eau

Dans les exemples précédents, on voit aussi à l'œuvre le manque de connexion, déjà évoqué, entre une description globale liée à la loi de l'hydrostatique et une description locale des forces de contact exercées par le fluide.

Cette difficulté a été testée avec un questionnaire visant à vérifier si les étudiants font une connexion entre la poussée d'Archimède, force globale bien connue, et les forces locales de pression agissant sur le solide, en l'occurrence un ballon de foot tenu immergé dans l'eau. Le questionnaire contient deux questions, que nous allons examiner respectivement dans ce paragraphe et dans le suivant.

Questionnaire "Ballon dans l'eau"

Un ballon de football est tenu immergé dans l'eau. Quatre disques identiques y sont dessinés, en haut A, en bas B, à droite C, à gauche D.

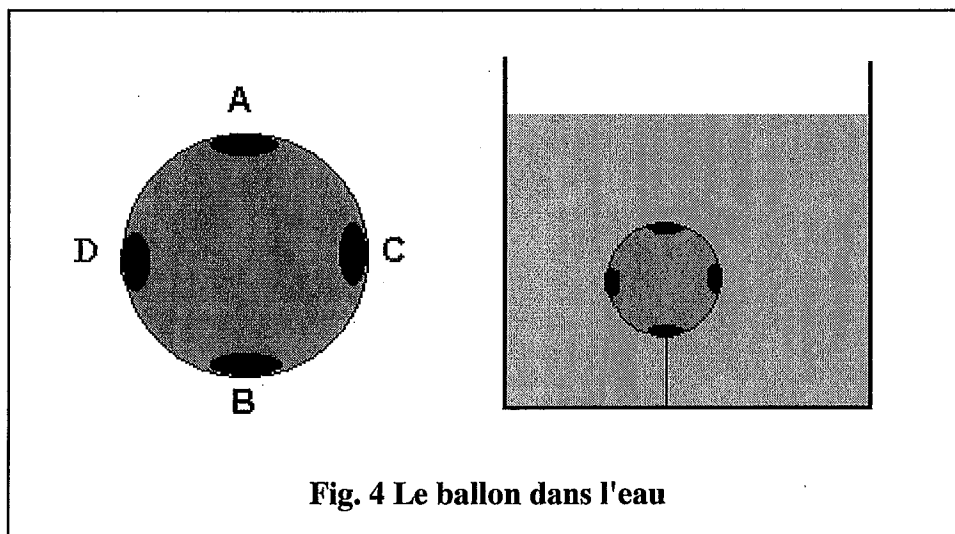


Fig. 4 Le ballon dans l'eau

Question 1

L'eau exerce-t-elle une force

| | | |
|-------------------|-----|-----|
| sur le disque A ? | oui | non |
| sur le disque B ? | oui | non |
| sur le disque C ? | oui | non |
| sur le disque D ? | oui | non |

Si vous avez répondu *oui* dans au moins deux cas, dites si ces forces ont la même intensité ou bien rangez-les par ordre croissant.

Réponse correcte : $F_B > F_C = F_D > F_A$. N=215 étudiants

| Tableau 8. Questionnaire "Ballon dans l'eau". Question 1 L'eau exerce-t-elle une force sur les disques A, B, C, D ? Si oui, dites si elles sont de la même intensité ou bien rangez-les par ordre croissant. | | | |
|---|---|-----|------|
| | Réponse | N | % |
| <i>a</i> | Correcte | 73 | 34% |
| <i>b</i> | $F(B) > F(A) ; F(C) = F(D)$ | 17 | 7,9% |
| <i>c</i> | $F(B) > F(A) = F(C) = F(D)$ ou $F(B) > F(A) > F(C) = F(D)$ | 14 | 6,5% |
| <i>d</i> | Seules $F(B) > F(A)$ | 16 | 7,4% |
| <i>e</i> | Quatre forces égales | 39 | 18% |
| <i>f</i> | Seule $F(B)$ | 13 | 6,0% |
| <i>g</i> | $F(A) > F(C) = F(D) > F(B)$ ou $F(A)$ plus grande | 8 | 3,7% |
| | autre | 27 | 13% |
| | Non réponses | 8 | 3,7% |
| | Total | 215 | 100% |

42% des étudiants donnent la réponse correcte *a*, ou celle qui est correcte mais pas complète *b*.

18% des étudiants répondent qu'il y a quatre forces égales.

Les autres réponses sont très variées. On trouve presque toutes les combinaisons possibles, mais avec des petits pourcentages.

En regroupant, on trouve que 33 étudiants (16%) pensent qu'il n'y a pas de forces sur les côtés et 14 (7%) que ces forces sont plus petites qu'en haut et en bas. Au total, l'effet de l'action verticale prévaut pour 23% d'entre eux.

Selon 27 étudiants, soit 13%, il n'y a pas de force au-dessus du ballon.

Seulement 60% des étudiants considèrent qu'il y a une force exercée en bas et en haut du ballon, et que celle en bas est plus grande ; il y a donc 40% qui se trompent sur ce point essentiel.

5.5.2 La poussée d'Archimède et les forces de pression

Questionnaire "Ballon dans l'eau"

Un ballon de foot est tenu immergé dans l'eau. Quatre disques identiques y sont dessinés, en haut A, en bas B, à droite C, à gauche D.

Question 2

Ces forces ont-elles quelque chose à voir avec la poussée d'Archimède ?

| Tableau 9. Questionnaire "Ballon dans l'eau". Question 2. Ces forces de pression ont-elles quelque chose à voir avec la poussée d'Archimède ? | | | |
|--|---|-----|------|
| | La poussée d'Archimède | N | % |
| <i>a, b</i> | n'a rien à voir, est une autre force qui s'ajoute aux forces de pression | 47 | 28% |
| <i>c, d</i> | est la force en B (bas du ballon), a à voir avec la seule force en bas du ballon | 46 | 27% |
| <i>e</i> | est la résultante des forces de pression, est un effet de ces forces | 18 | 11% |
| <i>f</i> | réponse "oui", mais sans justifications ou avec justifications génériques, pas claires ou non pertinentes | 36 | 21% |
| | autres | 4 | 2% |
| | Non réponses | 17 | 10% |
| | Total | 168 | 100% |

Les réponses *f* (21%) sont difficiles à classer, souvent il s'agit de réponses sèches, un «oui» sans plus de détails, ou accompagné d'une phrase générique sur la poussée d'Archimède, par exemple :

« Oui, car la poussée d'Archimède concerne tout objet plongé dans un liquide » 9S04.

« Oui, car c'est ce qui permet à la balle de remonter, d'où la nécessité de pousser à la main » 9S34.

Pour essayer de mieux comprendre la nature de ces réponses incertaines du type *f*, j'ai procédé à une analyse plus fine des justifications données par chaque étudiant pour l'ensemble du questionnaire, en considérant aussi les réponses à la question 1.

Cette analyse montre qu'une partie de ces étudiants a sûrement une conception non correcte, parce qu'ils considèrent qu'il n'y a pas de forces de pression au-dessous ou au-dessus

du ballon, ou ils pensent qu'il y a quatre forces de pression d'intensité égale agissant sur les quatre disques dessinés sur le ballon. Il paraît clair que, avec ces idées sur les forces exercées par l'eau sur le ballon, ces étudiants ne peuvent pas avoir une conception de la poussée d'Archimède comme résultante de ces forces. Donnons quelques exemples ci-dessous.

Q1 : « Les forces ont toutes la même intensité ». Q2 : « Oui, s'il n'y avait pas de poussée d'Archimède, le ballon coulerait car sa densité est faible ». 0C84

Q1 : « Les forces ont la même intensité, sinon le ballon se déformerait ». Q2 : « Oui, puisqu'il s'agit de forces exercées par un fluide et qu'Archimède s'applique aux fluides ». 0C05

Q1 : « $F_B > F_C = F_D$. L'eau n'exerce aucune force sur le haut du ballon, car celui-ci aura toujours tendance à remonter à la surface. Si l'eau exerçait une pression en A, alors le ballon resterait au milieu ou au fond de l'eau, sans remonter ». Q2 : « Oui, car les forces B, C et D font remonter le ballon ». 9C54

Q1 : « $F_A < F_C = F_D$ (pas de force en B). L'eau n'exerce pas de force vers le haut ». Q2 : « Oui ». 9C69

Q1 : « Les forces ont toutes la même intensité ». Q2 : « Oui, car la force d'Archimède est égale au poids du volume de liquide déplacé par le ballon ». 9C44.

Q1 : Force seulement en B. « La poussée d'Archimède (force exercée par l'eau en plus de la pression) ne s'applique que sur la moitié inférieure du ballon et donc la force appliquée sur cette moitié par l'eau est supérieure aux forces appliquées autre part sur le ballon par l'eau ». Q2 : « Oui, la poussée d'Archimède est également effectuée par l'eau »

Q1 : Force seulement en B. « Si il y avait quatre forces, le ballon resterait dans l'eau. Mais comme il remonte, il ne peut y avoir qu'une seule force sur le bas du ballon ». Q2 : « Oui, comme le ballon a un poids très petit, la force d'Archimède est beaucoup plus grande que le poids, ce qui fait remonter le ballon à la surface ». 9C11.

Cette analyse permet donc de séparer les réponses f en deux catégories, l'une, f_2 , sûrement erronée, l'autre, f_1 , encore douteuse, relevant d'un raisonnement qui n'est pas bien explicité. On obtient le tableau 10 suivant.

| Tableau 10. Questionnaire "Ballon dans l'eau". Question 2. Ces forces de pression ont-elles quelque chose à voir avec la poussée d'Archimède ? | | | |
|---|---|-----|------|
| | La poussée d'Archimède | N | % |
| <i>a, b</i> | n'a rien à voir, est une autre force qui s'ajoute aux forces de pression | 47 | 28% |
| <i>c, d</i> | est la force en B (bas du ballon), a à voir avec la seule force en bas du ballon | 46 | 27% |
| <i>e</i> | est la résultante des forces de pression, est un effet de ces forces | 18 | 11% |
| <i>f1</i> | réponse "oui", mais sans justifications ou avec justifications génériques ou non pertinentes | 21 | 13% |
| <i>f2</i> | réponse "oui", mais avec des indications clairement erronées (4 forces égales, pas de force en bas du ballon, force seulement en bas) | 15 | 8,9% |
| | autres | 4 | 2,4% |
| | Non réponses | 17 | 10% |
| | Total | 168 | 100% |

Les réponses *e*, qui lient de façon claire et nette la poussée d'Archimède aux forces de pression sont très rares, au total 11 %.

Celles qui, au contraire, expriment nettement que la poussée d'Archimède est autre chose que les forces de pression, soit *a+b*, représentent 28% du total. Quelques justifications :

« Non, la poussée d'Archimède pousse seulement du bas vers le haut, elle n'a rien à voir avec la pression qu'exerce un liquide autour d'un objet. La poussée d'Archimède concerne la poussée de l'eau qui est proportionnelle au volume que l'objet déplace » 9C38

« Non, rien à voir, car sont des forces de pression, ce qui est fondamentalement différent. » 9S66

« Non, puisque la poussée d'Archimède s'exerce vers le haut (non pour A, C, D). On pourrait le croire pour le cercle B, mais ce n'est pas le cas, car la poussée d'Archimède s'applique au centre de gravité du ballon. » 0C53

« ... pour la force B il y a en fait deux forces qui s'additionnent : les forces de pression et la poussée d'Archimède. » 9C21

« La force exercée vers le haut (en B) est composée de la pression à cette profondeur + la poussée d'Archimède. » 9C6

« La force exercée sur B est égale à la somme de la pression de l'eau et de la poussée d'Archimède. » 9S44

« Non, la poussée d'Archimède pousse seulement du bas vers le haut, elle n'a rien à voir avec la pression qu'exerce un liquide autour d'un objet. »

« ... en bas il y a en fait deux forces qui s'additionnent : les forces de pression et la poussée d'Archimède .

« Le fluide exerce une pression identique sur tout le ballon... Une force supplémentaire entre cependant en jeu : la poussée d'Archimède, qui fait remonter le ballon vers le haut. Donc, les forces en A, B, C et D sont identiques, mais une force supplémentaire s'exerce en B, la poussée d'Archimède. » 0C38

Il y a en outre les réponses c, d, qui présentent la poussée d'Archimède comme quelque chose qui ne concerne que le bas du ballon (27%).

« La force verticale en B est la poussée d'Archimède. » 99C17

« La force agissant sur B est la poussée d'Archimède, tandis que les forces agissant sur C et D sont dues à la pression dans le liquide. » 99C36

« La force exercée sur le point B est égale à la poussée d'Archimède. » 99C12

Au total, au moins 55% d'étudiants (réponses a, b, c, d) montrent clairement que, pour eux, la poussée d'Archimède n'est pas la résultante des forces de pression ; ils affirment qu'elle n'a rien à voir avec ces forces de pression, ou qu'elle a à voir seulement avec la force en bas du ballon, ou bien qu'elle s'identifie avec la seule force en bas. En ajoutant aussi les réponses f_2 , on obtient 64% d'étudiants qui ne font pas une connexion correcte entre la poussée d'Archimède et les forces de pression.

Le nombre assez élevé de non-réponses (10%), de la part d'étudiants qui par ailleurs répondent au reste du questionnaire, peut être un signe ultérieur d'incertitude et de difficulté sur cette question concernant la poussée d'Archimède.

Ces résultats confirment, de façon plus massive et explicite, une tendance déjà relevée par Pisani (1982) pour l'air et par Banon (1995) pour les liquides, moyennant des entretiens.

Plusieurs étudiants semblent être en situation de confusion à cause de la formule bien connue liant la poussée d'Archimède au volume du liquide déplacé et à la densité, ce qui leur paraît incompatible avec les forces de pression, qui, au contraire, dépendent de la surface et/ou de la profondeur :

« Non, parce que la poussée d'Archimède est directement proportionnelle au volume de l'objet en question et à la densité du liquide, tandis que la pression n'est pas influencée par le volume de l'objet. » 9C3

« Non, car la poussée d'Archimède n'est pas proportionnelle à la profondeur, mais au volume du liquide déplacé. » 0C76. Cet étudiant répond correctement à la question 1.

« Non, les forces sont dues à la pression de l'eau, qui est due à la profondeur, la poussée d'Archimède est due au volume du ballon et à la différence de densité entre l'eau et l'air du ballon. » 0C95

« Non, car la force d'Archimède dépend du volume d'eau déplacée, tandis que les forces exercées par l'eau sur un corps ne dépendent pas de ce corps, elles sont toujours identiques. » 9S18

Q1 : « Les forces ont la même intensité. Le fait qu'il faille retenir le ballon pour l'empêcher de remonter n'est pas dû à ces forces, mais bien à la force d'Archimède. ». Q2 : « Non, dans la formule de la poussée d'Archimède, la force qu'exerce l'eau sur les points du ballon n'est pas prise en compte ». 0C30

Q1 : « Les forces sont toutes égales. On pourrait croire qu'elles sont plus grandes en A et B à cause, respectivement, du poids du ballon et de la poussée d'Archimède. Cependant, ces deux forces s'appliquent au centre du ballon ». 0C53

On voit bien que les étudiants n'arrivent pas, en grande majorité, à établir une connexion raisonnable entre la poussée d'Archimède, comme force globale résultante, et les forces de pression locales de l'eau. Souvent elle apparaît comme une force spéciale, sans connexion avec la pression de l'eau.

Plusieurs étudiants soulignent la nature "globale" de la poussée d'Archimède, considérée comme une force de volume, agissant sur tout le ballon, appliquée au centre du ballon et dirigée vers le haut, en contraste avec les forces de pression, qui sont des forces de contact, "locales", agissant sur chaque petite partie du ballon et dirigées aussi vers le bas : contraste si radical que la connexion entre les deux phénomènes devient difficile à saisir.

La ténacité de cette difficulté est confirmée par les résultats du même questionnaire chez un groupe de 22 enseignants en formation à l'IUFM, auxquels il avait été proposé avec les autres questionnaires de ce chapitre, pour les tester et obtenir leurs commentaires et suggestions. Aux questionnaires "Récipients" et "Poissons" ils répondent tous, ou presque tous, correctement, tout comme à la question 1 du questionnaire "Ballon dans l'eau". Au contraire, à la question 2 sur la poussée d'Archimède, on trouve que seulement 12/22, soit 55%, répondent correctement, et 6/22, soit 27%, répondent que la poussée d'Archimède n'a rien à voir avec les forces de pression ou qu'elle s'ajoute à ces forces ; 5/22 s'abstiennent.

«Les forces de l'eau sur le ballon n'ont rien à voir avec la poussée d'Archimède. Elle rentre en compte quand on étudie le système entrant en équilibre. On a : $F_A + F_m + P = F_B + P_A$, où P =poids du ballon, P_A =poussée d'Archimède, F_m =force de la main qui tient le ballon». 9L9.

«À l'équilibre, on a : $F_C + F_D + F_A + F_B + \pi + P = 0$, où P =poids du ballon, π =poussée d'Archimède». 9L6

On voit que, pour ces deux enseignants, la poussée d'Archimède est une autre force, qui s'ajoute aux forces de pression.

«Non, pas du tout, ces forces de pression existent, qu'il y ait le ballon ou qu'il n'y ait pas de ballon. La poussée d'Archimède est une notion qui n'a un intérêt que lorsqu'un solide est immergé». 9L19

Presque la moitié de ces enseignants, qui dans les autres questions montrent qu'ils maîtrisent bien la statique des fluides, semblent ici avoir les mêmes difficultés que les étudiants, et n'arrivent pas à établir une connexion convaincante entre la poussée d'Archimède et les forces de pression de l'eau.

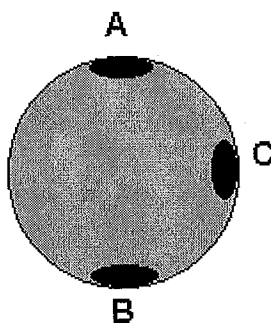
5.5.3 Les forces de pression sur un ballon dans l'air

Nous avons proposé à un groupe de 45 étudiants un autre questionnaire, similaire au précédent, mais comportant des questions concernant un ballon dans l'air.

Questionnaire "Ballon dans l'air" (45 étudiants)

Un ballon de foire est tenu par une ficelle (il faut le tenir, sinon il s'envole).

Trois disques rouges identiques y sont dessinés, situés respectivement au-dessus (A), au-dessous (B), sur un côté (C) du ballon (cf. la figure ci-dessous).



- a) L'air exerce-t-il une force (si oui précisez-en la direction) :
sur le disque A ? sur le disque B ? sur le disque C ?
Si vous avez répondu *oui* dans au moins deux cas (A, B, C), dites si ces forces ont la même intensité ou bien rangez-les par ordre croissant.
- b) Si on était sur une planète avec une gravité beaucoup plus petite que celle de la Terre, cela changerait-il quelque chose dans vos réponses concernant ces forces ?
Si vous répondez *oui*, précisez bien ce qui changerait et dans quel sens.

Résultats du questionnaire "Ballon dans l'air"

Direction des forces

15 étudiants, soit 33%, donnent la réponse correcte et complète ; 7 écrivent seulement que les forces sont perpendiculaires aux surfaces, sans en indiquer le sens, 10 n'indiquent pas la direction, 3 n'indiquent que la force sur B vers le haut. Selon 4 étudiants, il n'y a pas de force exercée en A, selon 2 il n'y a pas de force exercée en B, selon 7 il n'y a pas de force exercée en C.

Intensité des forces (42 réponses)

Il n'y a que 12 réponses correctes ou presque (29%), selon lesquelles la force en haut est plus petite qu'en bas.

Selon 14 étudiants (33%), il y a trois forces égales.

Au total, selon 16 étudiants (38%) les forces exercées sur A et sur B ont la même intensité.

Selon 12 étudiants, 29%, la force est plus grande en A qu'en B, et selon 9 (21%) la force sur le côté n'existe pas (7) ou elle est plus petite qu'en haut et en bas (2).

Planète (43 réponses)

L'interprétation des données est altérée par le fait que plusieurs étudiants répondent que rien ne change, mais dans le sens que le ballon tend encore à monter.

En tout cas, 15 étudiants (35%) répondent que "ça ne change rien", 21 (49%) que les forces seraient plus petites, et 3 que le ballon s'envolerait plus vite.

Une analyse des réponses montre qu'au moins deux tiers des étudiants ne possèdent pas clairement l'idée de forces sur le ballon qui augmentent avec la profondeur.

Quelques citations :

"La force en B est la poussée d'Archimède", C3, B17.

"L'air n'exerce pas vraiment une force, c'est le ballon qui tend à s'élever", C1.

" $F_A = F_B = F_C$, mais le ballon s'envole à cause de la poussée d'Archimède et de la nature du gaz", C5.

"La pression atmosphérique est due à la masse d'air et non à l'attraction de la Terre", B20.

Différence entre eau et air

Il y a quelques différences dans les réponses concernant l'intensité des forces.

Les réponses selon lesquelles la force en haut est plus petite qu'en bas sont majoritaires pour l'eau (60%), tandis qu'elles sont nettement minoritaires pour l'air (29%).

Dans le cas de l'air, il y a un pourcentage important d'étudiants (28%) qui répondent que la force en haut est plus grande qu'en bas, ce qui n'est fait que par 4% d'étudiants dans le cas de l'eau.

Ces résultats sont assez surprenants ; on peut penser que dans le cas de l'air, les étudiants envisagent beaucoup moins les variations de pressions avec l'altitude, pour les petites distances entre le haut et le bas du ballon.

Ils semblent penser plutôt que le ballon "tend" à remonter vers le haut et que l'air au-dessus lui fait obstacle, avec une force vers le bas agissant sur la partie supérieure du ballon.

La poussée d'Archimède est en effet souvent évoquée par les étudiants, pour expliquer que le ballon tend à monter vers le haut, mais cette poussée est soit une force qui n'a rien à voir avec la pression de l'air, soit elle n'est même pas une véritable force, mais seulement une "tendance" à aller vers le haut (*"L'air n'exerce pas vraiment une force, c'est le ballon qui tend à s'élever"*, écrit un étudiant).

Cette dernière explication fait penser à la théorie aristotélicienne des lieux naturels, plus qu'à une physique newtonienne, fondée sur des forces agissant entre des corps définis.

Précisons qu'il faut être très prudent en tirant des conclusions générales de ces derniers résultats, parce que le groupe qui a répondu au questionnaire sur le ballon dans l'air n'est pas très nombreux (N=45). Dans la comparaison entre les réponses concernant le ballon dans l'eau et le ballon dans l'air, il faut aussi tenir compte du fait qu'il s'agit de deux groupes d'étudiants différents, même s'ils sont tous des étudiants de première année universitaire, de la même Université, suivant un cours magistral de physique tenu du même professeur.

5.5.4 Quelques conclusions

Seulement 42% des étudiants interrogés donnent une réponse correcte, ou presque correcte, sur l'intensité des forces pressantes agissant en haut, en bas et sur les côtés d'un ballon immergé dans l'eau.

18% répondent qu'il y a quatre forces égales ; d'autres (15%) pensent qu'il n'y a pas de forces sur les côtés, et 7% pensent que ces forces existent mais qu'elles sont plus petites qu'en haut et en bas. Au total, l'effet de l'action verticale prévaut pour 22%. Selon 13% d'entre eux, il n'y a pas de force au-dessus du ballon.

Seulement 60% des étudiants considèrent qu'il y a une force en bas et en haut, et que celle en bas est plus grande. Il y a donc 40% qui se trompent sur ce point essentiel.

Les réponses dans le cas du ballon dans l'air sont assez similaires à celles du ballon dans l'eau, mais il y a moins de réponses correctes (29%) et il apparaît un pourcentage important d'étudiants (28%) qui répondent que la force en haut est plus grande qu'en bas.

Les étudiants qui lient de façon assez claire la poussée d'Archimède aux forces de pression ne sont que 11% du total ; d'autres (21%) répondent "oui" à la question portant sur une connexion entre les deux, mais ne donnent que de réponses sèches, sans justifications ou avec une phrase générique sur la poussée d'Archimède, et leur conception sur cet aspect reste donc incertaine.

Au moins 64% d'étudiants montrent clairement que, pour eux, la poussée d'Archimède n'est pas la résultante des forces de pression, soit parce qu'elle n'a rien à voir avec ces forces de pression (28%), soit parce qu'elle concerne uniquement la force en bas ou est identifiée à elle (27%), soit parce qu'ils considèrent qu'il n'y a pas de forces de pression au-dessous ou au-dessus du ballon ou qu'ils pensent que les forces de pression sont d'intensité égale partout sur le ballon (9%). Certains étudiants (12%) écrivent que la poussée d'Archimède est une autre force, agissant seulement en bas du ballon et qui s'ajoute aux forces de pression.

Ces résultats montrent nettement que la nature et l'origine de la poussée d'Archimède ne sont pas comprises par la grande majorité des étudiants. Ils connaissent la règle du "poids du fluide déplacé", mais ne font pas une connexion réelle entre cette description globale et une description locale, en termes des forces de pression que le liquide exerce sur chaque petite partie de la surface du ballon. Les considérations sur l'origine de la poussée d'Archimède relèvent plutôt de sa célébrité un peu mythique que d'une analyse fondée sur les lois de la physique, pourtant connues par les étudiants. Cette fameuse règle, ou loi globale, est parfois aussi un obstacle à la compréhension. En effet, plusieurs étudiants soulignent la nature "globale" de la poussée d'Archimède, considérée comme une force de volume, agissant sur tout le ballon, appliquée au centre du ballon et dirigée vers le haut, en contraste avec les forces de pression, qui sont des forces de contact, "locales", agissant sur chaque petite partie du ballon et dirigées aussi vers le bas : contraste si radical que la connexion entre les deux phénomènes devient difficile à saisir.

La ténacité de cette difficulté est confirmée par les résultats du même questionnaire chez un groupe d'enseignants en formation à l'IUFM : seulement 12/22, soit 55%, répondent correctement à la question sur la poussée d'Archimède. Donc, presque la moitié de ces enseignants, qui montrent dans les autres questions qu'ils maîtrisent bien la statique des fluides, n'arrivent pas à établir une connexion convaincante entre la poussée d'Archimède et les forces de pression de l'eau.

5.6 Variations internes et externes : les fluides sont-ils compressibles ?

Pour vérifier les idées des étudiants concernant la compressibilité des liquides et des gaz et les changements provoqués dans un fluide par une action externe, nous avons proposé les questionnaires "Seringue pleine d'eau" et "Seringue avec de l'air".

5.6.1 Les liquides sont-ils compressibles ?

Questionnaire "Seringue pleine d'eau"

On ferme le bout d'une seringue pleine d'eau.

Question 1

Si l'on pousse assez fort sur le piston, la pression de l'eau dans la seringue augmente-t-elle, diminue-t-elle ou reste-t-elle inchangée ?

Question 2

Et le volume augmente-t-il, diminue-t-il ou reste-t-il inchangé ?

| Tableau 11. Questionnaire "Seringue pleine d'eau" Question 1 e 2 Si l'on pousse assez fort sur le piston, la pression de l'eau dans la seringue augmente-t-elle, diminue-t-elle ou reste-t-elle inchangée ? Et le volume augmente-t-il, diminue-t-il ou reste-t-il inchangé ? | | | |
|--|--|-----|------|
| | Réponse | N | % |
| <i>a</i> | $p \uparrow \quad V \downarrow$ | 56 | 26% |
| <i>b</i> | $p \uparrow \quad V \downarrow \approx$ ou $p \uparrow \approx V \downarrow \approx$ | 23 | 11% |
| <i>c</i> | $p \uparrow \quad V =$ | 94 | 44% |
| <i>d</i> | $p = \quad V =$ | 32 | 15% |
| <i>e</i> | $p = \quad V \downarrow$ ou $p = V \downarrow \approx$ | 3 | 1,4% |
| <i>f</i> | autre | 2 | 0,9% |
| | incomplètes ou pas claires | 4 | 1,9% |
| | Total | 214 | 100% |

Une bonne majorité des étudiants, 59%, écrivent que le volume ne change pas (pour 15% même la pression ne change pas).

37% des étudiants envisagent un changement de volume. Pour une partie de ces étudiants, 8% du total, ce changement de volume existe, mais il est très petit ; ils écrivent que le volume reste *presque* égal, à part une *petite* diminution (indiquée dans le tableau par le symbole $\downarrow \approx$).

Les justifications ne sont pas nombreuses et ne font souvent que répéter la réponse donnée.

On peut classer en deux catégories les principaux raisonnements utilisés, raisonnements que j'appellerai "interne" et "externe" (ou "formel"), même si, chez certains étudiants, les deux catégories se confondent.

Dans la première, "interne" (17% du total), l'étudiant raisonne sur la base des changements dans l'état interne du liquide – l'élasticité de l'eau, sa réaction, sa tendance à revenir au volume initial – souvent en termes de molécules ou de particules de liquide, de déformations locales qui se transmettent dans le liquide. Dans ces cas, l'étudiant essaie de se former aussi une image de ce qui se passe dans le liquide.

«Si on pousse sur le piston, la pression de l'eau va augmenter. Comme les molécules d'eau sont plus poussées, la pression va augmenter, car il y aura plus de chocs entre les molécules. Si la pression augmente, le volume diminue, la densité de l'eau va augmenter, car les molécules d'eau seront plus assemblées et regroupées.» 0C15

«Le volume diminue. Puisqu'il y a une force qui pousse sur le piston, les molécules d'eau sont écrasées les unes contre les autres, ou du moins le nombre de chocs entre les molécules d'eau augmente.» 0C69

Dans la seconde catégorie de raisonnement, "externe" ou "formel" (27% du total), l'étudiant se limite à raisonner sur la relation $p=F/S$, ou à partir d'affirmations ou règles générales, comme "les liquides sont incompressibles". Lorsqu'il propose un raisonnement plus argumenté, il s'agit d'un raisonnement global, qui ne fait qu'exprimer verbalement les formules, par exemple "il faut mettre une même quantité d'eau dans un volume plus petit".

«La pression augmente, car elle est proportionnelle à la force exercée par le piston sur la surface d'eau de la seringue, $p \sim F$. Le volume reste inchangé.» 9C46

«La pression augmente, puisqu'on applique une force sur une certaine surface, mais qu'il n'y a pas de mouvement résultant. Le volume reste inchangé, puisque l'eau est pratiquement incompressible.» 9C06

Il est intéressant de remarquer que la plupart des justifications "externes" donnent une réponse sans changement de volume, tandis que celles que nous appelons "internes" donnent presque toujours une réponse avec une diminution de volume. On peut supposer que la considération de l'état interne du liquide amène à prendre en compte les modifications causées par la poussée du piston et entraîne l'idée d'une petite déformation, d'une compression du liquide.

Un autre type de justification est celle donnée par plusieurs étudiants, qui semblent raisonner sur l'eau de la même façon que pour les gaz, en ce qui concerne les variations de pression et de volume, en évoquant les formules des gaz parfaits, $pV=nRT$, $pV=k$.

«La pression augmente, car $pV=nRT$, $pV=cste$. Si le volume diminue, la pression augmente. Le volume diminue peut-être très peu, mais quand même car l'eau est un minimum compressible.» 00C20

«Si l'on pousse fort sur le piston, la pression augmente. ...Le volume diminue: $pV=nRT$, $p=nRT/V \rightarrow$ si $p \uparrow$, $V \downarrow$.» 0C66

«On sait que dans un fluide, $pV'=cte$, ... \rightarrow si on diminue le volume (puisque l'on pousse assez fort sur le piston), la pression doit augmenter.» 9C17

Selon quelques étudiants, l'eau a un volume minimum limite, pour lequel elle est "totalement comprimée", et au-delà duquel elle ne peut être comprimée davantage, "nos efforts ne serviront à rien".

«Le volume de l'eau diminue, mais seulement jusqu'à une valeur limite, au-delà duquel il ne pourra plus diminuer, nos efforts ne serviront à rien.» 98

«En considérant que le système est clos et que l'eau est liquide, donc est compressible, l'eau diminue de volume jusqu'à un certain volume limite.» 9C55

Beaucoup d'étudiants, pour justifier que le volume ne change pas, font appel à l'affirmation que "les liquides, l'eau, sont incompressibles", ce qui pourrait être pour eux plutôt un axiome ou une définition qu'une façon de se représenter la situation physique.

«Son volume reste inchangé, car l'eau est un fluide incompressible. On ne sait pas le réduire, même si on exerce une force importante.» 0C25.

«Si l'on pousse sur le piston, celui-ci n'avancera pas, mais il va augmenter la pression à la surface du liquide et donc augmente la pression dans tout le liquide. Le volume reste inchangé, car l'eau est un liquide incompressible.» 0C35.

«Le volume reste inchangé. Il est très difficile de compresser un liquide... Un liquide n'est pas un gaz et ne change donc pas son volume.» 0C33

La confusion qui peut être engendrée par cette formule verbale, souvent répétée dans l'enseignement, est montrée aussi par le fait que plusieurs étudiants l'interprètent comme signifiant que même la pression ne peut pas changer, comme d'ailleurs semble l'indiquer le mot « incompressible ».

«La pression reste inchangée, car l'eau est un liquide incompressible. Le volume reste inchangé, car l'eau est un liquide incompressible.» 9C69

«L'eau est un liquide incompressible. La pression de l'eau reste inchangée. Le volume reste inchangé.» 9C59

«La pression de l'eau dans la seringue reste la même, puisque l'eau est incompressible. Le volume reste également inchangé. Ni le volume, ni la pression ne changent.» 9C44

Compte tenu de cette insistance des textes scolaires et des enseignants sur la présumée « incompressibilité des liquides », le nombre d'étudiants qui répondent que le volume ne change pas, même s'il est majoritaire, ne paraît pas tellement élevé. Etant donnée cette "pression" de l'enseignement, trouver encore presque 40% d'étudiants qui envisagent une variation de volume est quelque peu surprenant. Cela pourrait bien signifier qu'en réalité, la conception spontanée qui prévaut est que les liquides sont compressibles, que leur volume peut changer, au moins un peu, suivant peut-être l'idée primitive que "si on pousse, ça s'écrase", tandis que c'est l'influence scolaire qui fait pénétrer l'idée de l'incompressibilité des liquides.

Cette hypothèse semble confirmée par les résultats du même questionnaire chez un groupe de 22 enseignants en formation à l'IUFM; auxquels il avait été proposé avec les autres questionnaires de ce chapitre, pour en avoir des commentaires et des suggestions. Aux questionnaires "Récipients" et "Poissons" ils répondent tous ou presque tous correctement. Sur le questionnaire "Seringue pleine d'eau", on trouve presque les mêmes pourcentages que ceux des étudiants : 59% pour la réponse $p \uparrow V =$, 14% pour $p \uparrow V \downarrow$ et 27% pour $p \uparrow V \downarrow \approx$. Les justifications données pour les réponses sans changement de volume répètent presque toutes que les liquides sont incompressibles :

«Le volume reste inchangé, car l'eau est un liquide incompressible. » 1L4

«Le volume reste inchangé, car les liquides sont des fluides incompressibles. » 1L4

Parfois, cette assertion apodictique ne manque pas de créer des ambiguïtés et des incertitudes, sinon un certain embarras chez quelques enseignants ; ils la répètent, mais ne semblent pas bien convaincus de son sens ou de sa validité réelle :

«L'eau est, par définition, un volume incompressible, donc le volume varie très peu, on dira qu'il reste inchangé. » 1L11

«Le volume reste constante, d'après l'incompressibilité de l'eau, (modèle idéal). Mais en pratique, l'eau est un peu compressible, donc le volume diminue très faiblement. » 1L9

Ces enseignants, qui montrent dans les autres questions qu'ils maîtrisent le sujet, insistent, donc, en bonne majorité, sur l'idée que les liquides sont incompressibles. Et ils ne manqueront pas d'essayer de la transmettre à leurs élèves.

5.6.2 La compressibilité de l'air

À une partie des étudiants qui ont répondu au questionnaire "Seringue plein d'eau" nous avons proposé aussi un questionnaire avec les mêmes questions, mais avec une seringue ne contenant que de l'air. (44 étudiants).

Questionnaire "Seringue avec de l'air"

On ferme le bout d'une seringue.

Question 1

Si l'on pousse assez fort sur le piston, la pression de l'air dans la seringue augmente-t-elle, diminue-t-elle ou reste-t-elle inchangée ?

Question 2

Et le volume augmente-t-il, diminue-t-il ou reste-t-il inchangé ?

Dans ce cas, pour l'air, la réponse $p \uparrow V \downarrow$ prévaut très nettement (35/44, 80%), même s'il y a encore 8 étudiants (18%) qui pensent que le volume de l'air ne change pas.

Les questionnaires "Seringue" pour l'air et l'eau, ont été proposés aussi à une classe de seconde d'un lycée français (29 élèves). Les résultats sont donnés dans le tableau 12.

| Tableau 12. Questionnaire "Seringue". 29 élèves de seconde On ferme le bout d'une seringue. Si l'on pousse assez fort sur le piston, la pression de l'eau ou de l'air dans la seringue augmente-t-elle, diminue-t-elle ou reste-t-elle inchangée ? Et le volume augmente-t-il, diminue-t-il ou reste-t-il inchangé ? | | | | |
|--|---------------------|-----|---------------------|------|
| | Seringue avec l'eau | | Seringue avec l'air | |
| $p \uparrow V \downarrow$ | 9 | 38% | 14 | 48% |
| $p \uparrow V =$ | 8 | 33% | 6 | 21% |
| $P = V =$ | 7 | 29% | 9 | 31% |
| NR | 5 | | 0 | 0% |
| Total | 29 | | 29 | 100% |

La plupart des élèves (22, soit 76%) répondent de la même façon aux deux questionnaires sur l'air et sur l'eau, 5 élèves ne répondent pas aux questions sur l'eau, seulement 2 élèves répondent différemment aux deux situations ($p \uparrow V \downarrow$ pour l'air, $p \uparrow V =$ pour l'eau).

En ce qui concerne la seringue avec l'eau, on voit que 61% des élèves considèrent que le volume ne change pas, un pourcentage similaire à celui qu'on a trouvé chez les étudiants (59%) ; mais davantage d'élèves pensent que la pression ne change pas non plus (29% contre 15%).

En ce qui concerne la seringue avec l'air, au contraire, on trouve un pourcentage beaucoup plus faible de réponses envisageant une diminution de volume (48% contre 80% des étudiants) et les réponses sans changement de volume demeurent majoritaires (52%), même si elles sont moins nombreuses que dans le cas de la seringue avec l'eau.

Ce dernier résultat concernant la seringue avec l'air peut être comparé avec celui obtenu, sur une question similaire, dans une enquête nationale pour évaluer les connaissances scientifiques au niveau 9 (âge 15 ans), organisée en Suède en 1992 (cf. Andersson et Bach 1996, voir aussi par. 2.3). Dans la question proposée dans l'enquête, est précisé que la distance entre le piston et le fond du cylindre est de 10 cm et les élèves doivent choisir entre cinq réponses possibles. 42% des élèves ($N=3103$) répondent qu'il n'est pas possible de faire avancer le piston (air incompressible), les autres répondent que le piston avancera, soit d'environ un millimètre (33% des élèves), soit d'environ un centimètre (15%), soit de plusieurs centimètres (4%), soit jusqu'au fond du cylindre (4%).

Les justifications pour les réponses $p \uparrow V \downarrow$ se partagent à moitié entre les deux typologies suivantes :

- l'air ou l'eau seront plus denses, plus tassés, le volume diminue ;
- on pousse, on appuie, on exerce une force, la pression augmente.

Les justifications pour les réponses sans changement de volume évoquent aussi le fait qu' "il n'y a pas de sortie", "l'eau ou l'air ne s'échappent pas, ne disparaissent pas". 8 réponses sont sans justifications claires, 7 élèves justifient la réponse pour l'eau en écrivant que c'est "pareil que pour l'air".

5.6.3 Quelques conclusions

Dans le cas de la seringue remplie d'eau, une majorité des étudiants, 60%, répondent que le volume ne change pas (pour 15% même la pression ne change pas). 37% des étudiants envisagent un changement de volume, et pour une partie de ces étudiants, 8% du total, ce changement de volume existe, mais il est très petit ; ils écrivent que le volume reste *presque* égal, à part une *petite* diminution.

En général, les étudiants qui, dans leurs justifications, se limitent à raisonner en termes de force externes, par la relation $p=F/S$, ou avec des affirmations ou règles formelles générales, donnent plus souvent une réponse sans changement de volume, tandis que ceux qui considèrent *l'état interne* du liquide – l'élasticité de l'eau, sa réaction, sa tendance à revenir au volume initial – souvent en termes de molécules ou de particules de liquide, de déformations locales qui se transmettent dans le liquide, donnent presque toujours une réponse avec une (petite) diminution de volume.

On peut faire l'hypothèse que la conception spontanée qui prévaut est que les liquides sont compressibles, que leur volume peut changer, au moins un peu, suivant peut-être l'idée primitive "si on pousse, ça s'écrase", tandis que c'est l'influence scolaire qui fait pénétrer l'idée de l'incompressibilité des liquides.

Cette hypothèse semble confirmée par les résultats du même questionnaire chez un groupe de 22 enseignants en formation à l'IUFM, auxquels il avait été proposé ainsi que les autres questionnaires de ce chapitre, pour recueillir leurs commentaires et suggestions. Ces enseignants, qui montrent dans les autres questions une bonne maîtrise du sujet de la statique des fluides, donnent, eux aussi, une majorité de réponses sans changement de volume (59%). Dans leurs justifications, ils expriment, en bonne majorité, l'idée que les liquides sont incompressibles, une idée que, probablement, ils ne manqueront pas d'essayer de transmettre à leurs élèves.

Dans le cas de la seringue ne contenant que l'air, la réponse $p \uparrow V \downarrow$ prévaut très nettement (80%), même s'il y a encore 18% d'étudiants qui pensent que le volume de l'air ne change pas.

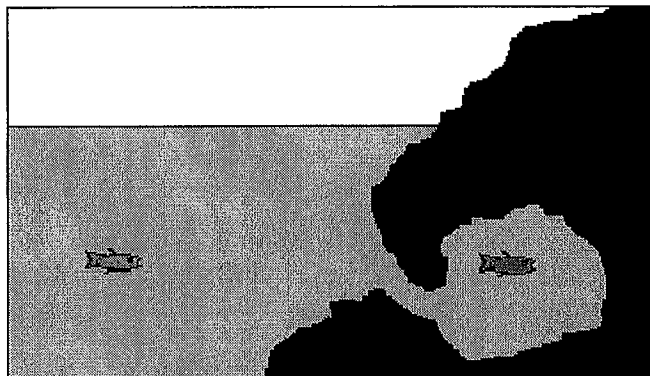
En ce qui concerne les élèves de lycée, la plupart (76%) répondent de la même façon aux questions sur l'air et sur l'eau. Dans le cas de l'air, ils se partagent presque par moitié entre ceux qui pensent que le volume diminue et ceux qui répondent que le volume ne change pas. Dans le cas de l'eau, il y a une majorité pour le non-changement de volume, avec presque le même pourcentage que pour les étudiants (62%), tandis que 38% pensent que le volume diminue. Les justifications pour les réponses sans changement de volume évoquent le fait qu'"il n'y a pas de sortie", "l'eau ou l'air ne s'échappent pas", "ne disparaissent pas".

5.7 Le texte des questionnaires utilisés

Questionnaire "POISSONS"

Justifiez toujours bien vos réponses, s'il vous plaît

Les questions suivantes concernent la situation de la figure.



Question 1

La pression de l'eau est

- a) égale pour les deux poissons
- b) plus grande pour le poisson dans la grotte
- c) plus grande pour le poisson en pleine mer

Question 2

L'eau exerce-t-elle une force sur le rocher en bas de la grotte ?

Le rocher exerce-t-il une force sur l'eau en bas de la grotte ?

Question 3

L'eau exerce-t-elle une force sur le rocher en haut de la grotte ?

Le rocher de la grotte exerce-t-il une force sur l'eau en haut de la grotte ?

Questionnaire "CHAMBRE"

On mesure la pression de l'air dans une chambre (avec une fenêtre ouverte) et à l'extérieur. On trouve

- a) la même pression dans les deux cas
- b) une pression plus grande dans la chambre
- c) une pression plus grande à l'extérieur

Justifiez bien vos réponses, s'il vous plaît.

Merci

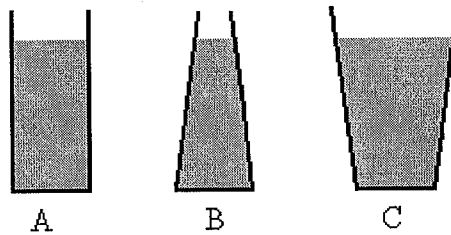
Questionnaire "RECIPIENTS"

Justifiez toujours bien vos réponses, s'il vous plaît

Question 1

Dans les trois récipients de la figure il y a de l'eau, jusqu'au même niveau.
La force que l'eau exerce sur le fond du récipient est

- a) égale dans les trois récipients
- b) plus grande dans le récipient A que dans les autres
- c) plus grande dans le récipient B que dans les autres
- d) plus grande dans le récipient C que dans les autres



Les fonds des récipients sont égaux

Question 2

Dans un récipient cylindrique il y a de l'eau.

Si on déplace le récipient dans un endroit où la pression atmosphérique est plus faible, mais la gravité est la même, cela change-t-il quelque chose dans la force que l'eau exerce sur le fond du récipient ? Pourquoi ?

Question 3

Dans un récipient cylindrique on verse de l'eau.

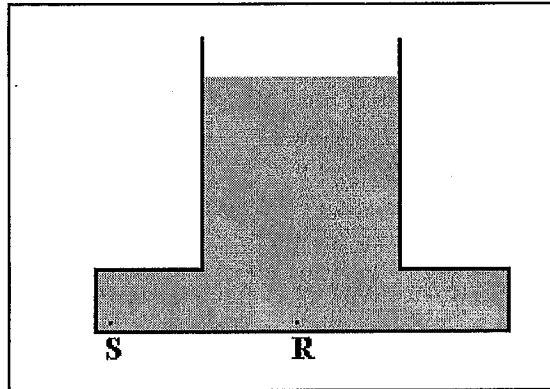
La force exercée par l'eau sur le fond du récipient est-elle égale au poids de l'eau versée ou bien plus grande, ou plus petite que celui-ci ?

- a) égale au poids de l'eau
- b) plus grande que le poids de l'eau
- c) plus petite que le poids de l'eau
- d) dépend de la largeur du récipient

Question 4

Dans le récipient de la figure il y a de l'eau.

La pression en S est-elle égale, supérieure ou inférieure à la pression en R ?



Merci

Questionnaire "INTERACTIONS"

Il existe quatre interactions ou forces fondamentales : gravitationnelle, électromagnétique, nucléaire forte, faible.

Quand on va sous l'eau, en profondeur, en mer ou en piscine, on peut sentir une gêne ou une douleur à l'oreille, à cause du fait que l'eau exerce sur le tympan une force, qui devient plus intense en descendant plus en profondeur.

Cette force est une force :

- a) gravitationnelle
- b) électromagnétique
- c) nucléaire forte
- d) faible

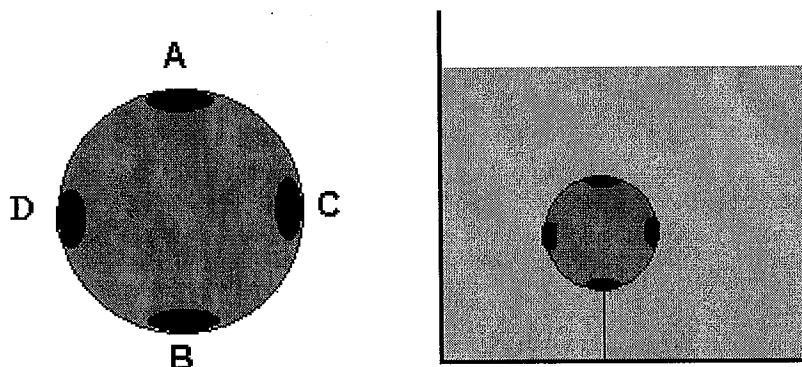
Justifiez bien votre réponse, s'il vous plaît.

Merci

Questionnaire "BALLON DANS L'EAU"

Un ballon de football est tenu complètement immergé dans l'eau, par une ficelle fixée au fond. Il faut le tenir par la ficelle, sinon il remonte à la surface.

Quatre disques noirs identiques y sont dessinés, situés respectivement au-dessus (A), au-dessous (B), sur les cotés (C, D) du ballon (cf. la figure).



Question 1

L'eau exerce-t-elle une force (si oui précisez-en la direction, par une flèche sur la figure)

| | | |
|-------------------|-----|-----|
| sur le disque A ? | oui | non |
| sur le disque B ? | oui | non |
| sur le disque C ? | oui | non |
| sur le disque D ? | oui | non |

Si vous avez répondu *oui* dans au moins deux cas, dites si ces forces ont la même intensité ou bien rangez-les par ordre croissant.

Justifiez bien votre réponse, comme si vous deviez l'expliquer à quelqu'un.

Question 2

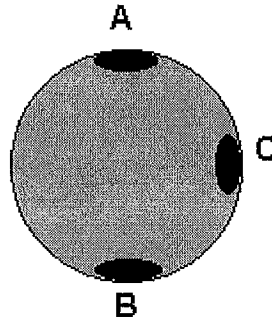
Ces forces ont-elles quelque chose à voir avec la poussée d'Archimède ?

Justifiez bien votre réponse, s'il vous plaît.

Questionnaire "BALLON DANS L'AIR"

Un ballon de foire est tenu par une ficelle (il faut le tenir, sinon il s'envole).

Trois disques rouges identiques y sont dessinés, situés respectivement au-dessus (A), au-dessous (B), sur un côté (C) du ballon (cf. la figure ci-dessous).



- a) L'air exerce-t-il une force (si oui précisez-en la direction) :
sur le disque A ? sur le disque B ? sur le disque C ?

Si vous avez répondu *oui* dans au moins deux cas (A, B, C), dites si ces forces ont la même intensité ou bien rangez-les par ordre croissant.

- b) Si on était sur une planète avec une gravité beaucoup plus faible que celle de la Terre, cela changerait-il quelque chose dans vos réponses concernant ces forces ?
Si vous répondez *oui*, précisez bien ce qui changerait et dans quel sens.

Questionnaire "SERINGUE AVEC L'EAU"

Justifiez toujours bien vos réponses, s'il vous plaît.

On ferme le bout d'une seringue pleine d'eau.

QUESTION 1

Si l'on pousse assez fort sur le piston, la pression de l'eau dans la seringue augmente-t-elle, diminue-t-elle ou reste-t-elle inchangée?

QUESTION 2

Et le volume augmente-t-il, diminue-t-il ou reste-t-il inchangé ?

Merci

Questionnaire "SERINGUE AVEC DE L'AIR"

Justifiez toujours bien vos réponses, s'il vous plaît.

On ferme le bout d'une seringue et on pousse sur le piston.

QUESTION 1

La pression de l'air contenu dans la seringue change-t-elle ?
Si oui, comment ?

QUESTION 2

Et le volume augmente-t-il, diminue-t-il ou reste-t-il inchangé ?

Merci

Chapitre 6. Une séquence d'enseignement sur la statique des fluides

6.1 Objectifs et caractéristiques de la séquence

L'étude des raisonnements décrite aux chapitres 4 et 5 a montré que de nombreux étudiants ont du mal à bien comprendre la pression dans les fluides, en présence de la gravité, même en situation statique simple.

Les aspects de raisonnement suivants nous semblent être à l'origine de certaines difficultés, liées à l'idée de la pression comme *le poids du fluide au-dessus*. Les étudiants

- raisonnent sur des actions selon la direction verticale, du haut vers le bas, presque jamais du bas vers le haut et encore moins en direction horizontale ;
- sont concentrés sur l'idée qu'il faut *soutenir* ce qu'il y a au-dessus, et ils ne pensent pas aux déformations et aux modifications de l'état interne et local du liquide ;
- pensent qu'il ne se passe rien en haut de la grotte, qu'en haut de la grotte l'eau ne pousse pas sur le rocher, ni le rocher sur l'eau (le rocher tient tout seul, n'a pas besoin d'être soutenu par l'eau au-dessous).

Pour essayer de remédier à ces problèmes, nous avons élaboré une courte séquence d'enseignement, en nous appuyant sur les résultats des recherches précédentes (chap. 2), sur l'analyse de contenu et des leviers susceptibles *a priori* de favoriser la compréhension (chap. 3) et sur la recherche sur les raisonnements des étudiants (chap. 4 et 5). La séquence a été élaborée en collaboration avec Laurence Viennot (Université de Paris 7) et Jacques Lega (Université de Louvain la Neuve, Belgique).

Le savoir de référence relève de la statique des liquides en présence de gravité, modèle particulière et aspects cinétiques et thermiques étant exclus. Sont en cause le caractère scalaire de la pression, sa relation avec la force exercée sur un élément de surface d'orientation quelconque, et la variation de pression avec l'altitude au sein du liquide. La séquence vise à mettre les étudiants en mesure d'utiliser ces éléments du savoir de référence pour analyser des situations où l'idée de " poids au-dessus " fait souvent obstacle. On se propose de suggérer aux étudiants une typologie de raisonnement et de solliciter leur attention sur des aspects en général négligés, qui pourraient aider à modifier les tendances décrites auparavant, notamment sur les actions qui s'exercent horizontalement et verticalement du bas vers le haut, le rôle des parois et des petites déformations du fluide.

L'analyse commune étant centrée sur des actions verticales du haut vers le bas, et presque jamais du bas vers le haut ou horizontalement, il nous fallait activer une analyse selon une direction horizontale, en précurseur d'une analyse de l'isotropie, et mettre en œuvre l'idée de modification de l'état du liquide associée aux variations de pression. Cette démarche implique à la fois l'idée de réaction du système à une perturbation et celle de modification locale du liquide.

Il nous semble que pour avancer dans la compréhension, il ne suffit pas de dire ce que *doit être* telle ou telle grandeur, mais aussi d'explorer comment *se produit* l'état qu'on analyse ou, au moins, comment l'état local se concilie avec des bilans plus globaux.

Nous cherchons donc à connecter le raisonnement *global*, formel, fondé sur les lois et formules concernant le fluide en étude, par exemple $\Delta p = -\rho g \Delta h$, et le raisonnement *local*, causal, fondé sur ce qui se passe dans un certain petit endroit du fluide, ce qui change dans les propriétés locales du liquide. Pour joindre ces deux typologies de raisonnement, il faut activer un raisonnement *systémique*, fondé sur les interactions entre les parties du fluide, sur une transmission des changements, qui puisse expliquer le *mécanisme* qui conduit à établir une nouvelle situation d'équilibre.

Un élément important dans cette articulation entre descriptions locale et globale est de cesser d'affirmer qu'un liquide est incompressible, au sens où il le serait absolument, ce qui semble exclure toute modification locale et donc toute différence concernant l'action du liquide sur la paroi ou le fluide au voisinage. Comment un élément de fluide pourrait-il transmettre au voisin l'effet d'une perturbation, si lui-même n'est en rien modifié ? Les variations de volume des liquides sont souvent négligeables dans les calculs, mais elles sont essentielles pour comprendre ce qui se passe, pour construire une explication causale. D'ailleurs, nier totalement la compressibilité des liquides signifie annuler toute une filière importante de recherche scientifique (cf. Bridgman 1958, Aitken et Tobazéor 1998).

Notre analyse conduit au choix de proposer, pour la description des fluides en présence de gravité, un modèle au niveau *mésoscopique*, ce qui permet d'envisager un contact entre les éléments bases de la modélisation. Ce niveau permet de ne pas s'engager sur ce qui justifie la répulsion entre éléments de fluide, qui est à rapporter à la cinétique moléculaire. Les objets analogues choisis pour ces unités mésoscopiques sont des balles de mousse, traitées d'abord comme des entités mécaniques, ensuite comme un modèle d'éléments de fluide.

Il faut souligner l'importance du caractère mésoscopique du modèle. En effet, un modèle microscopique serait incapable de rendre compte, de façon simple, des effets du poids, en forme totalement statique, car pour cela il faut, c'est du moins l'hypothèse adoptée, que les unités du modèle soient en contact entre elles. Des boules éparses, comme des molécules, ne fonctionnent pas à cet égard. Tout modèle microscopique nécessite la prise en charge des aspects cinétiques, sans quoi il est inefficace pour rendre compte des aspects considérés ici. Si l'on veut rester dans un modèle complètement statique, on est obligé de passer à un niveau mésoscopique, de façon à cacher à l'intérieur de l'unité mésoscopique du modèle (la balle de mousse, dans notre cas) les aspects cinétiques, dont les effets sont transformés en une résistance élastique, représentée par les forces de pression.

Les balles de mousse ne sont pas, donc, le correspondant analogique des molécules, mais plutôt des *particules*, des *gouttelettes* de liquide. En effet, l'analyse en termes d'éléments de fluide, à un niveau mésoscopique, est la méthode standard employée pour traiter la statique et aussi la dynamique des fluides, la cinétique moléculaire demeurant cachée et représentée globalement, dans ses effets, par les grandeurs macroscopiques pression et température. Mais cette décomposition en petites parties est faite de façon abstraite et mathématique. En plus, dans l'étude de la statique des fluides en présence de la gravité, elle n'est faite, en général, qu'en direction verticale, par couches planes de petite épaisseur Δh , pour passer ensuite à la limite pour $\Delta h \rightarrow 0$, la discrétisation mésoscopique n'existant donc que pour l'axe vertical et en tant que procédure mathématique intermédiaire, dans le but de retourner tout de suite à une représentation continue.

Nous avons voulu *rendre accessible* à l'intuition des étudiants cette décomposition mésoscopique, en évoquant des objets macroscopiques avec lesquels établir une analogie de comportement, en ce qui concerne le champ bien limité de la statique des fluides en présence de la gravité. Les petites "quantités évanescences", typiques du discours du calcul

infinitésimal, deviennent, dans notre modèle, des objets, qui peuvent interagir, pousser et être comprimés.

C'est cela qui fait la particularité, et aussi la limite du modèle, lui-même susceptible d'intervenir seulement dans une phase limitée de l'enseignement de la mécanique des fluides.

Nous cherchons ainsi à connecter le déroulement de la séquence aux raisonnements les plus communs chez les étudiants. Comme on l'a déjà dit au chapitre 3, notre hypothèse est que les conceptions des étudiants peuvent être utilisées comme point de départ pour construire une structure conceptuelle plus complexe et puissante. La prise en compte des tendances communes du raisonnement et leur utilisation explicite, sous certaines conditions et avec des modalités opportunes, peuvent aider à canaliser l'apprentissage vers un changement conceptuel stable, qui permette de faire positivement coopérer le formalisme du physicien et les exigences de la pensée commune. Le modèle mésoscopique proposé dans notre séquence nous semble bien rejoindre les *conceptions d'ancrage* évoquées au paragraphe 3.7, comme étant des idées communes très répandues, utilisables positivement dans ce contexte, à savoir : la conception de la pression comme tassement, l'idée que "si on pousse, ça s'écrase" et que les corps au-dessus *écrasent* ceux au-dessous en les déformant, la préférence pour les explications causales, en termes d'enchaînements de causes et d'effets.

La mécanique des balles de mousse, avec ses règles et ses limites d'application, constitue la syntaxe qui transforme la simple analogie intuitive en un modèle, simple mais opérationnel, dont la mise en œuvre permet de comprendre certains aspects de la statique des liquides, d'activer des raisonnements spécifiques, comportant des passages du modèle au liquide et vice-versa, et de faire des prévisions sur des questions simples. Il faut bien dire, et l'expérience faite le confirme, que, si *le support* du modèle (les balles de mousse) est accessible à l'intuition, l'analyse en termes des lois de la mécanique, qui décrit son fonctionnement et permet son application, ne l'est pas ; au contraire, elle demande une certaine abstraction et un minimum d'habileté en mécanique élémentaire, en particulier en ce qui concerne l'utilisation des propriétés vectorielles des forces.

Il est évident que ce modèle ne permet pas aller très loin, mais il peut constituer une aide didactique, c'est notre hypothèse, à l'objectif très spécifique et limité qu'on se pose.

L'étape de modélisation qui devrait suivre est celle qui permet de « rentrer » dans l'unité mésoscopique, ce qui amène à l'échelle microscopique des particules constituant le fluide et devra permettre une approche plus fine de l'isotropie et surtout celle des propriétés thermoélastiques des gaz.

La séquence débute avec des réflexions purement mécaniques sur des balles de mousse, pour les utiliser ensuite comme un modèle de fluide, dans l'étude de la pression d'un liquide en situation statique en présence de la gravité.

Un des objectifs était aussi de faire bien comprendre la loi des forces réciproques dans les situations présentées dans la séquence. Pour saisir cet objectif, notre proposition était d'utiliser systématiquement les schémas éclatés, lors de la représentation des forces agissant sur les boules ou sur les parois. Sur cet aspect, toutefois, la négociation avec les enseignants qui ont expérimenté la séquence n'a pas abouti à un accord, faute de temps, donc l'utilisation des schémas éclatés n'a pas été garantie et, en effet, ils n'ont presque jamais été utilisés.

La pression de l'air au-dessus du liquide constitue évidemment un facteur important pour la compréhension de la situation physique, elle est évoquée lors de la séquence, mais ne fait pas l'objet explicite et spécifique d'une application du modèle, à cause des limites du temps disponible. Cet aspect et, plus en général, l'utilisation du modèle dans des situations relatives à l'interface entre gaz et liquide constituent une des possibles lignes de développement ultérieur de notre recherche.

La séquence sera décrite en détail dans la section 6.3.

6.2 Dispositif expérimental

La séquence d'enseignement a été expérimentée deux ans de suite (1999 et 2000) en première année universitaire scientifique à Louvain la Neuve, après un cours magistral classique sur ce thème.

Le cours théorique de statique des fluides (4 heures) a été laissé inchangé, et chaque année les groupes expérimentaux (5 groupes en 1999 et 11 groupes en 2000, pour un total de 71 et 169 étudiants respectivement) ont suivi la séquence pendant que les groupes de contrôle (5 groupes en 1999 et 7 en 2000, pour un total respectivement de 77 et 94 étudiants) étaient occupés dans des séances classiques d'exercices d'hydrostatique.

Dans l'année 1999, les séances expérimentales ont été dirigées par Jacques Lega. Dans l'expérimentation de l'an 2000, une partie des étudiants a reçu la séquence par J. Lega, les autres (à peu près la moitié) l'ont reçue par deux enseignants, qui n'ont participé à aucune phase de l'élaboration de la séquence.

Il s'agit d'une *micro séquence* : nous voulons ainsi tester s'il est possible de produire des changements très ciblés sur quelques aspects de la compréhension d'un domaine bien limité, avec des modifications apparemment petites de l'enseignement, qui n'en changent pas les contours habituels.

Dans l'expérimentation de l'an 1999, la séquence s'est déroulée en une seule séance de deux heures, dans laquelle le professeur a présenté le modèle et son utilisation, avec des exemples et des questions posées au débat des étudiants.

L'évaluation a été faite via un test d'entrée et des post-tests. Tous les questionnaires utilisés et cités dans la suite sont présentés à la fin du chapitre (6.4).

Avant le début de la séquence le même questionnaire, "Récipients", a été proposé pour les deux groupes (expérimental et de contrôle) comme test d'entrée. Le but était de tester le niveau de compréhension du sujet de la part des étudiants et de comparer les deux groupes, expérimental et de contrôle, pour en vérifier l'équivalence.

Après la séquence, environ quatre semaines plus tard, nous avons fait passer chez tous les groupes, comme post-tests, les questionnaires "Poissons", "Ballon dans l'eau", "Seringue" et "Casserole".

Dans l'analyse des post-tests, nous avons remarqué que les justifications données n'étaient pas très nombreuses et qu'elles étaient souvent assez courtes ou peu expressives. Il était surtout difficile de bien en extraire des indications importantes concernant les processus de raisonnement des étudiants et les effets de la séquence sur la façon d'aborder le problème et de voir la situation physique proposée.

Nous avons alors décidé, pour la seconde année d'expérimentation, d'ajouter une séance supplémentaire, d'une demi-heure, qui s'est déroulée une semaine après la précédente, sous forme de travaux dirigés, les étudiants travaillant et débattant en groupes de deux ou trois.

Dans cette séance finale de la séquence, nous avons proposé aux étudiants, travaillant en groupes de deux, de revenir sur la première question du pre-test "Récipients". Il s'agissait de comparer les forces exercées par l'eau sur le fond (de même surface) de trois récipients, de formes différentes, remplis jusqu'au même niveau. Les étudiants débattaient entre eux, pendant que le professeur circulait d'un groupe à l'autre. Neuf binômes volontaires ont été enregistrés, la discussion durant de l'ordre de 15-20 minutes. Des feuilles de réponses (14) avec des dessins et des commentaires ont aussi été recueillies.

Ces enregistrements, avec les feuilles de réponses, ont constitué un élément crucial pour une évaluation interne de la séquence portant sur l'évolution des raisonnements des étudiants, liée aux acquis de la séquence.

L'évaluation externe a été faite en utilisant les mêmes pre-tests et post-tests qu'en 1999, sans le questionnaire "Casseroles", qui n'a pas été proposé en 2000. Des variations mineures, sur la forme, ont été apportées dans quelques questionnaires.

Suivant une idée de plus en plus développée dans la littérature didactique (cf. Colin 1999, Hirn 1998, Hirn et Viennot 2000, Viennot et al. 1999, Pinto et al. 2000), la séquence a été proposée à des groupes d'enseignants en formation, dans le but de recueillir des indications à partir de leurs réactions et de leurs évaluations sur une éventuelle utilisation en classe de la séquence.

6.3 Description de la séquence

6.3.1 La mécanique des balles de mousse

Les balles de mousse ont une masse et un poids, elles peuvent être déformées et comprimées, mais réagissent aux déformations par des forces élastiques, de la même façon dans toutes les directions. Elles sont très raides, c'est-à-dire qu'elles ont un coefficient de compressibilité très petit par rapport aux forces prises en considération, donc il y a des déformations bien réelles, mais très petites. Les valeurs $\Delta V/V$ et $\Delta \rho/\rho$ (V et ρ étant respectivement le volume et la masse volumique d'une balle), sont faibles, mais on en tient compte dans les raisonnements.

Si l'on pousse sur une balle de deux cotés opposés, elle s'écrase un peu, se déforme et tend à s'élargir dans les autres directions. Si elle est bloquée dans ces directions par une paroi ou par une autre balle, alors elle pousse plus fort contre l'objet qui la bloque, car elle résiste aux compressions.

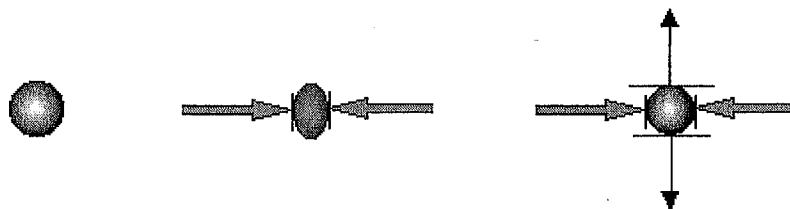


Fig.1 Eléments de base du modèle : les balles de mousse peuvent être déformées et leur éventuelle (faible) déformation se répercute sur les voisines

Au début de la séquence, l'enseignant propose trois situations, qu'on décrit aussi via des dessins et des graphiques représentant les intensités des forces mutuelles entre les balles en fonction de la position du point de contact de chaque paire de balles.

a) Situation horizontale.

Une série de balles est placée horizontalement sur une table. D'un côté il y a une paroi, de l'autre on pousse avec la main sur la première balle. A l'équilibre, les forces entre les balles voisines sont toutes de même intensité.

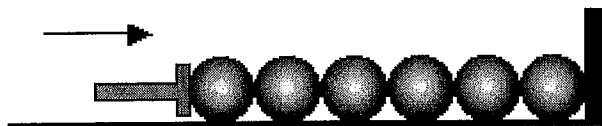


Fig.2 Une série horizontale de balles de mousse, calées par une paroi.
Un expérimentateur exerce une force vers la droite.

L'enseignant amène les étudiants à faire un schéma des forces pour chaque balle, et insiste sur le fait que les forces dirigées vers la droite ont la même intensité que celles qui sont dirigées vers la gauche.

L'enseignant fait construire un graphique de l'intensité des forces $F(n)$, l'indice n ($n=0,1,2,3,\dots$) désignant les points de contact successifs entre deux balles voisines (fig.3). Les points du graphique sont tous sur une droite parallèle à l'axe horizontal n .

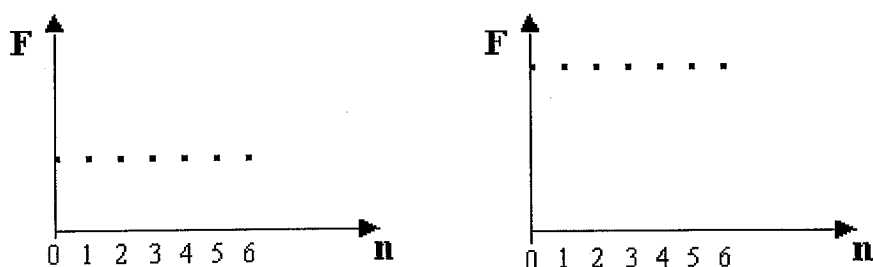


Fig.3 Situation horizontale : graphiques $F(n)$ de l'intensité F des forces entre deux balles de mousse voisines, en fonction du numéro d'ordre n du point de contact, ceci pour deux valeurs différentes de la poussée extérieure.

Pour qu'il y ait l'équilibre, *il faut que les forces réciproques aient la même intensité le long de toute la file horizontale* de balles de mousse. L'enseignant fait comprendre que, si l'expérimentateur pousse plus fort, les forces augmentent d'intensité, mais *toutes de la même façon*, et que les intensités sont donc encore toutes égales entre elles. Le graphique est encore une droite horizontale, mais *déplacée vers le haut*. En faisant varier la force externe, on fait varier toutes les intensités des interactions à la fois, tout en gardant l'égalité de l'intensité des forces tout au long de la file.

L'enseignant propose aussi de construire un graphique $F(x)$, x étant l'abscisse de la position des points de contact entre les balles voisines (fig. 4). On obtient les mêmes résultats qu'auparavant, les points du graphique sont encore sur une droite horizontale, qui se déplace parallèlement vers le haut, si l'on pousse plus fort. Mais dans ce cas les points se rapprochent un petit peu, quand on accentue la poussée, car les balles se compriment légèrement et donc la distance entre les points de contact diminue un peu.

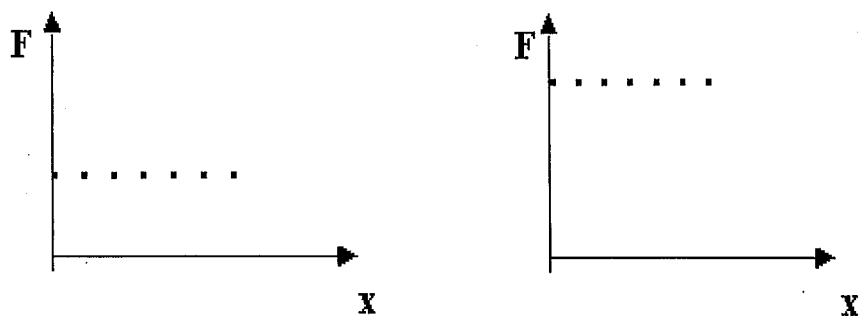


Fig.4 Situation horizontale : graphiques $F(x)$ de l'intensité des forces F entre deux balles de mousse voisines, en fonction de la position x des points de contact, ceci pour deux valeurs différentes de la poussée extérieure (l'espacement des points correspondant à la longueur d'une balle).

b) Situation verticale, poussée extérieure vers le bas.

L'enseignant propose la seconde situation.

Des balles sont placées l'une sur l'autre, la plus basse est appuyée sur le sol, la plus haute est poussée par la main vers le bas.

Dans ce cas, les forces entre les balles voisines ne sont pas toutes de même intensité : plus on va vers le bas, plus elles augmentent, à chaque fois d'une quantité égale au poids d'une balle.

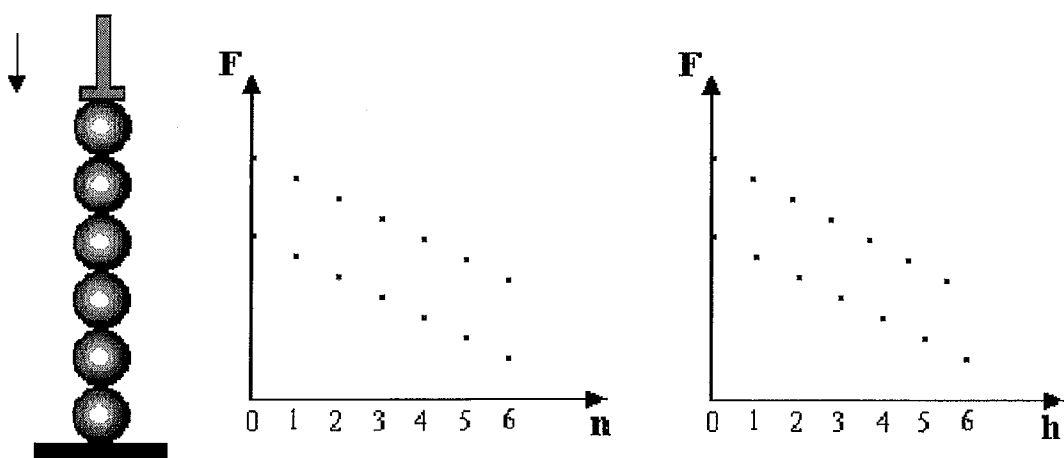


Fig.5 Pile de balles de mousse subissant une poussée extérieure vers le bas. Graphiques $F(n)$ et $F(h)$ représentant l'intensité F des forces impliquées dans chaque interaction de contact entre deux balles voisines, en fonction du numéro d'ordre n ou de l'altitude h des points de contact (de bas en haut), ceci pour deux valeurs différentes de la poussée extérieure.

L'enseignant amène les étudiants à faire un schéma des forces et insiste sur le fait que, pour chaque paire de balles associée à un point de contact, la force d'interaction dirigée vers le haut a la même intensité que sa réciproque dirigée vers le bas.

L'enseignant amène les étudiants à faire un graphique de l'intensité des forces $F(n)$, l'indice n ($n=0,1,2,3\dots$) désignant les points de contact successifs entre deux balles voisines, à partir

du bas (fig.5). Les points du graphique se disposent tous sur une droite inclinée, décroissant avec n .

Si l'expérimentateur accentue sa poussée, les balles subissent des petites déformations et les forces augmentent d'intensité, mais *toutes de la même façon*, et donc les différences ΔF , entre l'intensité des forces correspondant à deux points de contact successifs, demeurent inchangées, étant toujours égales au poids de chaque balle. En faisant varier la force exercée par l'expérimentateur, on fait varier toutes les intensités des interactions à la fois, tout en gardant inchangées leurs différences. Le graphique est encore une droite inclinée, mais *déplacée parallèlement vers le haut*.

L'enseignant propose aussi de construire un graphique $F(h)$, h étant l'altitude par rapport au sol des points de contact entre les balles voisines.

Les points de ce graphique ne sont pas exactement sur une droite. En effet, la différence ΔF entre les intensités de deux forces correspondant à deux points de contact successifs est constante tout au long de la pile, étant toujours égale au poids d'une balle, qui est le même pour toutes les balles. Au contraire, la distance Δh entre deux points de contact successifs diminue légèrement en allant du haut vers le bas, à cause des déformations des balles dues aux forces de contact, qui sont plus grandes en bas qu'en haut. Donc, le rapport $a = \Delta F / \Delta h$ n'est pas exactement constant pour toutes les balles, mais il augmente vers le bas. Ces différences sont toutefois très petites, car la différence ΔF , qui est égale au poids des balles, est très petite en comparaison avec les forces nécessaires pour provoquer des déformations importantes. On peut donc dire encore, avec une très bonne approximation, que les points du graphique $F(h)$, qui représente une fonction décroissante de h , sont sur une droite inclinée.

Si la poussée extérieure devient plus forte, cette droite se déplace vers le haut, mais, à cause des déformations des balles, deux points successifs de la nouvelle droite seront à une distance Δh un peu plus petite qu'auparavant, tandis que les valeurs ΔF ne changent pas et sont encore égales au poids de chaque balle. Par conséquent la droite devient un peu plus inclinée, $\Delta F / \Delta h$ augmente, mais très peu. On peut donc dire que la droite se déplace vers le haut, tout en étant *presque parallèle* à la précédente.

En conclusion, on peut dire que le graphique $F(h)$ envisagé est *presque* une droite, inclinée, qui se déplace *presque* parallèlement vers le haut, si l'on pousse plus fort. Ces "presque" indiquent des variations de l'ordre de 10^{-4} à 10^{-3} ou moins.

c) Situation verticale, poussée extérieure vers le haut

L'enseignant aborde ensuite la troisième situation.

Les balles sont encore placées verticalement l'une sur l'autre, mais la plus basse est appuyée contre la main, la plus haute est contre le plafond.

Tout comme dans la situation b , les forces entre balles voisines ne sont pas de même intensité, leur intensité diminue, d'un point de contact au suivant situé juste au-dessus, d'une quantité égale au poids de chaque balle. Les graphiques sont identiques aux précédents.

Si l'on pousse plus fort vers le haut, les forces augmentent toutes de la même quantité et le graphique $F(n)$ se *déplace parallèlement vers le haut*. Si l'on augmente la force exercée par l'expérimentateur, le diagramme monte en bloc, les différences ΔF entre l'intensité des interactions à deux points de contact successifs demeurant égales au poids de chaque balle.

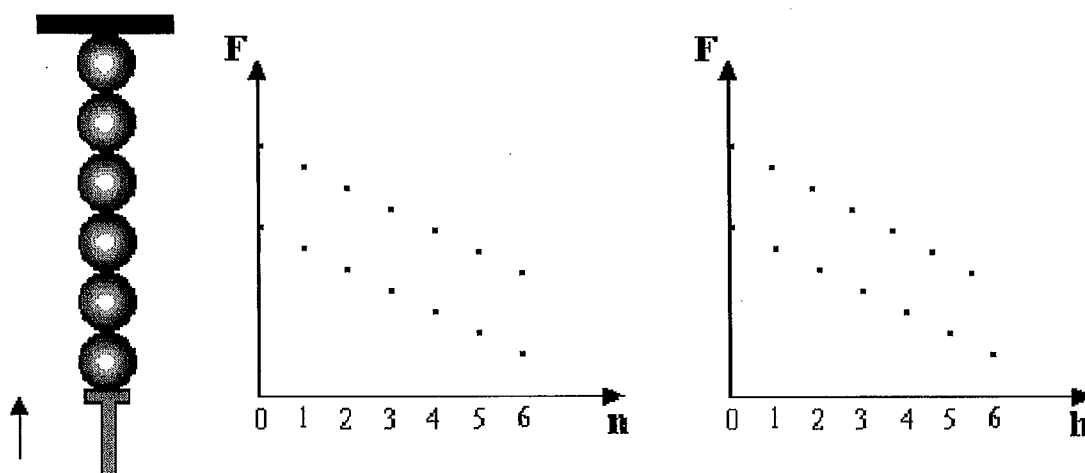


Fig.6 Pile de balles de mousse subissant une poussée extérieure vers le haut. Graphiques $F(n)$ et $F(h)$ représentant l'intensité F des forces impliquées dans chaque interaction de contact entre deux balles voisines, en fonction du numéro d'ordre n ou de l'altitude h des points de contact (de bas en haut), ceci pour deux valeurs différentes de la poussée extérieure.

Pour le graphique $F(h)$ on peut faire les mêmes considérations que pour la situation *b*. Le graphique $F(h)$ est *presque* une droite, inclinée. Si l'expérimentateur accentue la poussée, il y aura une petite diminution des valeurs Δh de la distance entre deux points de contact successifs, ce qui fait que le graphique de la fonction $F(h)$ ne se déplace pas de façon exactement *parallèle*, mais *presque*.

L'enseignant souligne bien l'identité de l'analyse des deux situations *b*, *c* et le fait que la balle la plus haute pousse sur le plafond, qui exerce sur celle-ci la force réciproque.

6.3.2 Analogie entre liquide et balles de mousse

L'enseignant propose explicitement une analogie entre le diagramme $F(h)$ pour les balles de mousse et celui associé à la pression $p(h)$ pour les fluides.

Le débat revient sur les situations horizontale et verticale, et conduit à faire deux graphiques $p(x)$ et $p(h)$.

A propos des valeurs négligeables des déformations dues aux forces prises en considération, l'enseignant explique que dans les conditions usuelles, les approximations faites pour les balles de mousse sont valables pour les liquides, mais pas pour les gaz.

Le coefficient de compressibilité de l'eau étant $\chi = (\Delta V/V)/\Delta p = 4,5 \cdot 10^{-10} \text{ Pa}^{-1}$, on peut calculer que pour avoir une variation de volume ou de densité de 1%, à température constante, il faut une pression de 200 atm, soit une profondeur d'environ 2 km. Pour une profondeur de 20 m, on obtient une variation de volume de 10^{-4} , soit 0,01%. Bridgman (1958), dans ses expériences sur les hautes pressions, a trouvé que, en augmentant la pression jusqu'à 12 kbar, l'eau réduit son volume d'environ 20%.

Lorsqu'on augmente la pression p_m au niveau du piston, la variation relative de la pente $a = \Delta p / \Delta h$ du graphique $p(h)$ est : $\Delta a / a = \chi \cdot \Delta p$. Ceci correspond à une variation $\Delta a / a \approx 1\%$ avec une valeur de $\Delta p = 200 \text{ atm}$.

L'enseignant propose ensuite d'étudier la pression dans un récipient fermé, complètement rempli d'eau, avec un piston qui permet de pousser *en direction horizontale* sur l'eau (fig.7).

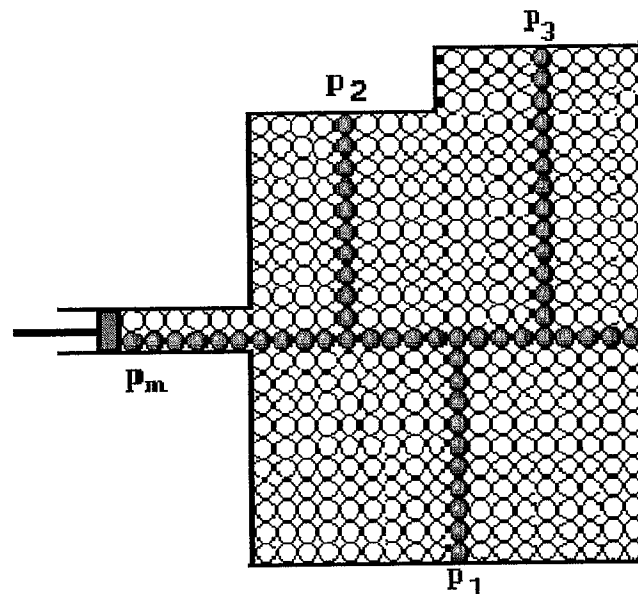


Fig.7 Un fluide dans un récipient clos et sous l'action d'un piston.
Modélisation à l'aide d'éléments mésoscopiques, analogues des balles de mousse étudiées auparavant.

L'enseignant amène les étudiants à débattre des questions suivantes, assorties ici d'éléments de réponses attendues.

- Quels sont *tous* les points où la pression est égale à la pression p_m en un point près du piston ? Et quels sont *tous* les points où la pression est égale à celle p_1 d'un point au fond du récipient ? Même question pour la pression p_2 en un point au plafond du récipient, dans la partie la plus basse, et pour celle p_3 en un point au plafond du récipient, dans la partie la plus haute. L'analogie avec les balles de mousse en file horizontale est mise en oeuvre.
- Si l'on change la valeur de la force exercée par le piston, que se passe-t-il ? Comme dans le cas *a* des balles de mousse, le diagramme de la pression $p(x)$ pour les points situés sur une même ligne horizontale monte ou descend en bloc, tout en gardant son horizontalité (fig. 8). Ceci signifie que les pressions changent toutes de valeur, tout en demeurant égales entre elles.
- La variation de la pression au niveau du piston a-t-elle des répercussions en direction verticale ? Oui, parce que, lorsque p_m augmente, les boules sur la même ligne horizontale poussent plus fort sur leurs voisines, y compris dans la direction verticale, vers le haut et vers le bas. Il y a ici une faiblesse du modèle, qui peut bien faire comprendre l'existence d'une transmission de la poussée dans toutes les directions, mais n'arrive pas à justifier l'isotropie des ces forces. L'enseignant pose, comme élément de la théorie admise, l'isotropie des forces associées à la pression en un point, en précisant que le modèle n'en rend pas compte.

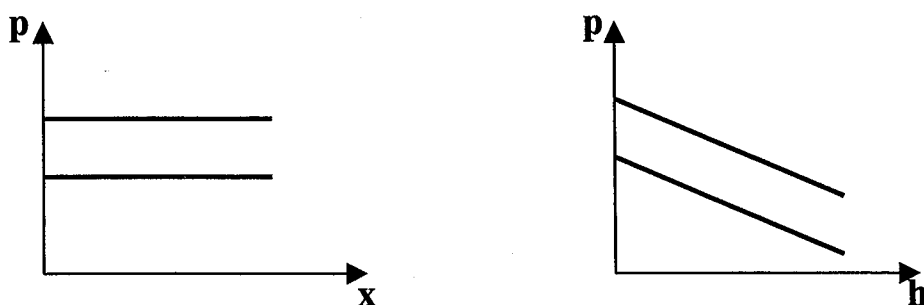


Fig.8 Graphiques $p(x)$ et $p(h)$ représentant la valeur de la pression p le long de séries d'éléments de fluide :

- a) en fonction de l'abscisse x des points considérés sur une ligne horizontale ;
- b) en fonction de l'altitude h des points considérés sur une colonne verticale.

Ceci pour deux valeurs de la poussée extérieure.

L'enseignant développe l'analogie sur la base de graphes. Il s'agit de développer l'argumentation suivante.

Tout comme dans les cas de la main qui poussait les balles de mousse, pousser vers le haut, vers le bas ou en direction horizontale une colonne de liquide dont l'autre extrémité est bloquée revient à faire varier en bloc les intensités de toutes les interactions, en maintenant leurs différences

L'enseignant utilise encore une fois le graphique de la fonction $F(h)$ comparé à celui de la fonction $p(h)$, en référence explicite aux colonnes de liquide dans le récipient en étude, qui sont en cause pour l'étude des pressions aux points considérés auparavant (P_1, P_2, P_3, P_m).

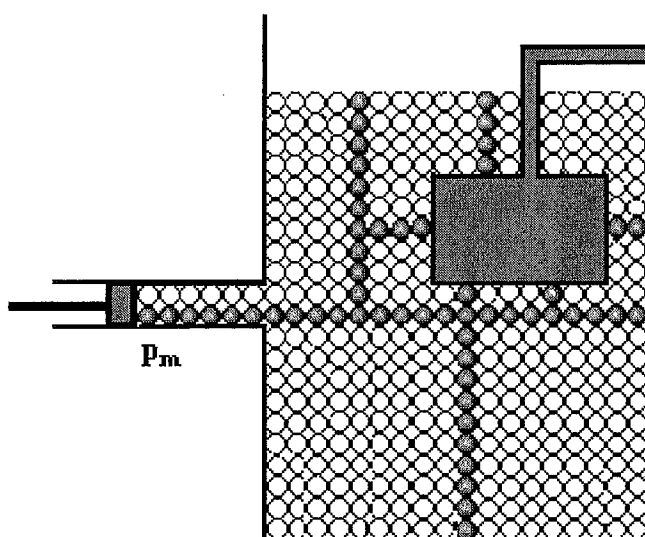


Fig.9 Analogie entre liquide et balles de mousse :
un récipient ouvert rempli d'eau, avec un objet immergé.

Pour amener une réflexion sur les interactions de l'eau avec les parois de l'objet ou d'une enclave introduite dans l'eau, l'enseignant porte l'analyse sur une modification du récipient représenté en figure 7 (voir figures 9 et 10).

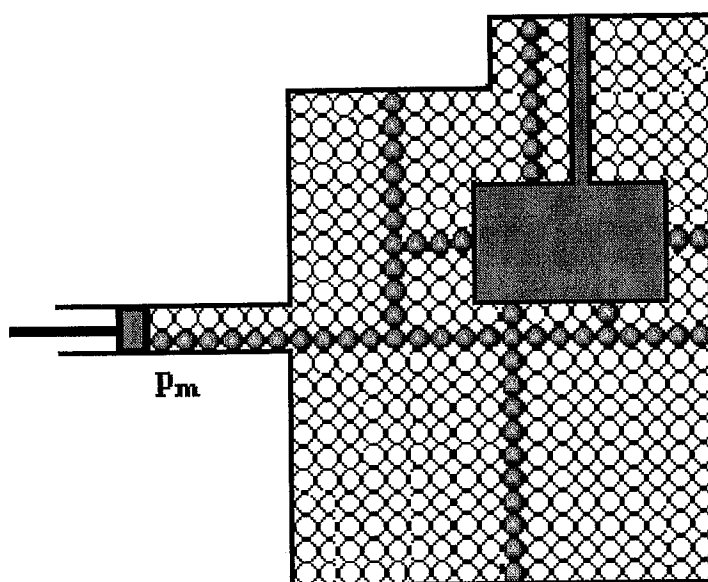
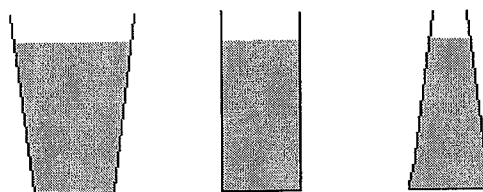


Fig.10 Analogie entre liquide et balles de mousse : un liquide dans un récipient clos, avec une enclave, et sous l'action d'un piston.

6.3.3 Débats finaux en petits groupes

Dans la phase finale, l'enseignant propose aux étudiants de revenir sur la première question du questionnaire d'entrée "Récipients" (fig. 11), en leur demandant s'ils envisagent maintenant de changer leurs réponses, et si oui, pour quel motif.



Les fonds des récipients sont égaux

Fig.11 Comparaison des forces exercées par l'eau sur le fond de trois récipients de forme différente, remplis jusqu'au même niveau : comment concilier les lois concernant la pression dans le fluide et l'analyse des interactions locales.

Les étudiants travaillent en petits groupes, de deux ou trois.

On leur propose aussi de réfléchir sur la comparaison des pressions en deux points A, B de récipients, tels que ceux qui sont représentés en figure 12.

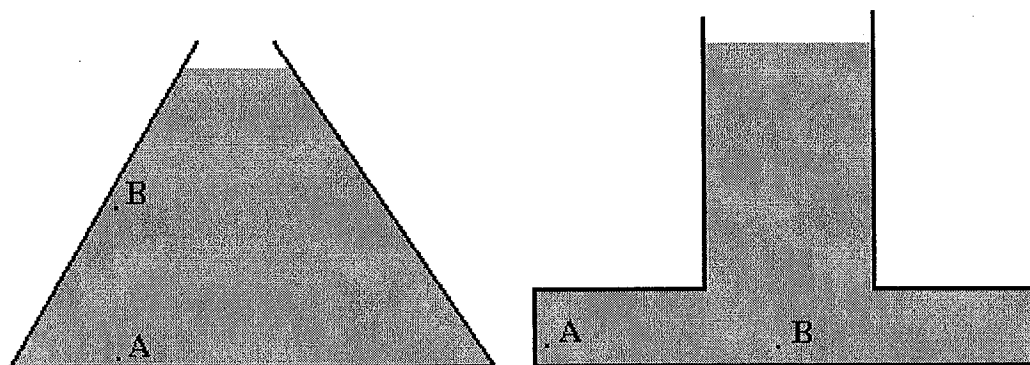


Fig.12 Comparaison de la pression en deux points A, B d'un récipient de forme irrégulière: comment concilier les règles concernant la pression dans le fluide et l'analyse des interactions locales.

6.4 Le texte des questionnaires utilisés

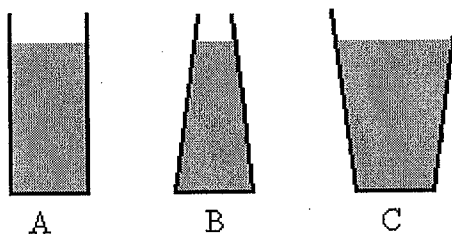
Questionnaire "RECIPIENTS"

Justifiez toujours bien vos réponses, s'il vous plaît

Question 1

Dans les trois récipients de la figure il y a de l'eau, jusqu'au même niveau. La force que l'eau exerce sur le fond du récipient est

- a) égale dans les trois récipients
- b) plus grande dans le récipient A que dans les autres
- c) plus grande dans le récipient B que dans les autres
- d) plus grande dans le récipient C que dans les autres

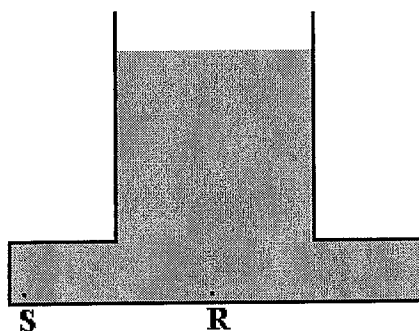


Les fonds des récipients sont égaux

Question 2

Dans le récipient de la figure il y a de l'eau.

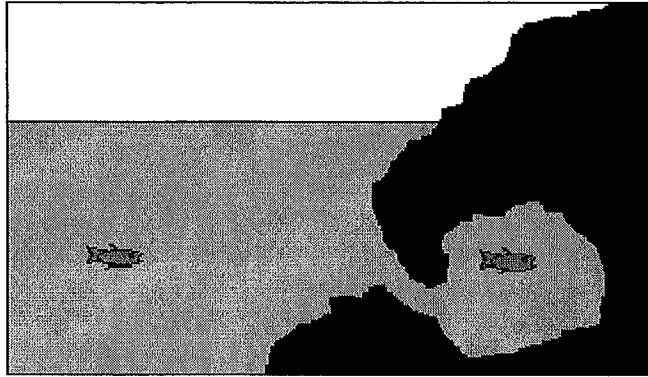
La pression en S est-elle égale, supérieure ou inférieure à la pression en R ?



Questionnaire "POISSONS"

Justifiez toujours bien vos réponses, s'il vous plaît

Les questions suivantes concernent la situation de la figure.



Question 1

La pression de l'eau est

- a) égale pour les deux poissons
- b) plus grande pour le poisson dans la grotte
- c) plus grande pour le poisson en pleine mer

Question 2

L'eau exerce-t-elle une force sur le rocher en bas de la grotte ?

Le rocher exerce-t-il une force sur l'eau en bas de la grotte ?

Question 3

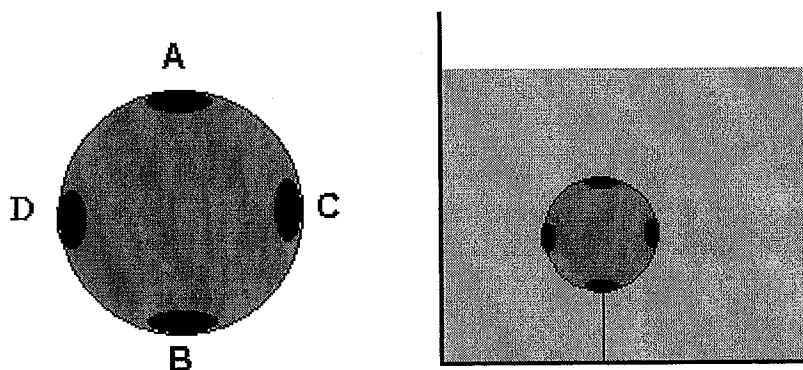
L'eau exerce-t-elle une force sur le rocher en haut de la grotte ?

Le rocher de la grotte exerce-t-il une force sur l'eau en haut de la grotte ?

Questionnaire "BALLON DANS L'EAU"

Un ballon de football est tenu complètement immergé dans l'eau, par une ficelle fixée au fond. Il faut le tenir par la ficelle, sinon il remonte à la surface.

Quatre disques noirs identiques y sont dessinés, situés respectivement au-dessus (A), au-dessous (B), sur les cotés (C, D) du ballon (cf. la figure).



Question 1

L'eau exerce-t-elle une force (si oui précisez-en la direction, par une flèche sur la figure)

| | | |
|-------------------|-----|-----|
| sur le disque A ? | oui | non |
| sur le disque B ? | oui | non |
| sur le disque C ? | oui | non |
| sur le disque D ? | oui | non |

Si vous avez répondu *oui* dans au moins deux cas, dites si ces forces ont la même intensité ou bien rangez-les par ordre croissant.

Justifiez bien votre réponse, comme si vous deviez l'expliquer à quelqu'un.

Question 2

Ces forces ont-elles quelque chose à voir avec la poussée d'Archimède ?

Justifiez bien votre réponse, s'il vous plaît.

Questionnaire "SERINGUE"

Justifiez toujours bien vos réponses, s'il vous plaît.

On ferme le bout d'une seringue pleine d'eau.

QUESTION 1

Si l'on pousse assez fort sur le piston, la pression de l'eau dans la seringue augmente-t-elle, diminue-t-elle ou reste-t-elle inchangée?

QUESTION 2

Et le volume augmente, diminue ou reste inchangé ?

Questionnaire "CASSEROLE"

Justifiez toujours bien vos réponses, s'il vous plaît

Dans une casserole il y a de l'eau.

QUESTION 1

Les molécules de l'eau choquent-elles les parois de la casserole ?

QUESTION 2

Si l'on chauffe l'eau, la pression de l'eau au fond du récipient change-t-elle ?
Si oui, augmente-t-elle ou diminue-t-elle ?

Chapitre 7. Evaluation de la séquence: les questionnaires

7.1 Elaboration des questionnaires

7.1.1 Le pre-test

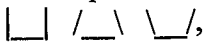
L'équivalence du groupe expérimental et du groupe de contrôle pourrait bien être considérée assurée par le fait que la partition a été faite au hasard, sur une population assez nombreuse (plus de 400 étudiants), provenant du même milieu et fréquentant les mêmes cours universitaires, à l'Université Catholique de Louvain.

Pour assurer une meilleure rigueur méthodologique à la recherche, nous avons voulu en tout cas tester cette équivalence présumée au moyen d'un questionnaire, qui a donc servi comme pre-test à l'expérimentation de la séquence didactique. D'ailleurs, les réponses à ce même questionnaire ont aussi été utilisées dans la partie de cette recherche concernant l'étude des raisonnements des étudiants sur la pression dans les fluides (voir le chap.5).

Dans la définition du pre-test, le critère a été de vérifier la présence et la fréquence, chez les étudiants concernés, des raisonnements typiques, déjà mis en évidence comme sources d'erreur dans notre étude précédente. En particulier, les raisonnements selon lesquels :

- La force exercée par un liquide sur le fond d'un récipient est égale ou s'identifie avec le poids de tout le liquide contenu dans le récipient, quelle que soit sa forme.
- Ce qui détermine, ce qui *fait* la pression dans un liquide est la quantité, le poids du liquide situé directement au-dessus du point considéré.
- Dans un espace plus petit, étriqué, la pression est plus grande, car le liquide est *comprimé*, tassé.

Pour tester la présence et les conséquences de ces trois conceptions, nous avons utilisé un simple questionnaire, "Récipients", avec deux questions.

Dans la question 1, nous demandons de comparer les forces exercées par l'eau sur le fond de trois récipients aux formes différentes , remplis au même niveau.

Dans la question 2, nous demandons de comparer la pression en deux points différents au fond d'un même récipient, à la forme irrégulière.

La première conception peut être observée dans la question 1 et aussi, mais moins nettement, dans la question 2. Elle renvoie au *paradoxe hydrostatique* (voir par. 3.2), dans ses deux formes qu'on peut abréger en "forces égales avec différentes quantités de liquide" et "forces différentes avec égales quantités de liquide".

La deuxième conception, que nous avons aussi appelée du "fluide sur la tête", agit typiquement dans la situation de la question 2, mais elle entre aussi fréquemment en action dans la question 1, lorsque les étudiants mettent en œuvre des raisonnements fondés sur la pression, avant d'arriver à la force.

La troisième idée, moins présente à ce niveau scolaire, en général, peut apparaître dans les deux questions, mais surtout dans la seconde.

7.1.2 Le post-test

Avec les post-tests, nous avons voulu vérifier l'effet éventuel de la séquence sur les raisonnements indiqués plus haut et sur la compréhension de situations simples de statique des liquides.

Dans ce but, les questionnaires "Poissons", "Ballon dans l'eau", "Seringue" et "Casserole" ont été utilisés.

a) Le questionnaire "Poissons"

Le questionnaire "Poissons" a été proposé avec trois questions.

Dans la première, on demande simplement de comparer la pression pour deux poissons, l'un en pleine mer et l'autre dans une grotte sous-marine. L'objectif y est de vérifier les éventuelles modifications produites dans les raisonnements des étudiants et aussi l'utilisation éventuelle qu'ils font des suggestions fournies lors de l'intervention de la séquence et du modèle des balles de mousse.

Dans les deux autres questions, on demande si l'eau exerce une force sur le rocher et si le rocher exerce une force sur l'eau, en bas de la grotte et en haut de la grotte. Ces deux questions sont motivées par l'observation, faite dans les recherches préliminaires, que certains étudiants, qui pensent que la pression dans la grotte est plus petite qu'en pleine mer, ne considèrent pas l'existence d'une force exercée par le rocher sur l'eau et/ou par l'eau sur le rocher, en haut de la grotte dont le plafond qui "tient tout seul" n'a pas besoin d'être *soutenu par l'eau* :

« Le rocher ne repose pas, ne pousse pas sur l'eau : si l'eau sèche, le rocher ne tombe pas » (9S06, 9S29).

Cette idée, que rien ne se passe au plafond de la grotte, pourrait être une des causes de la réponse fausse selon laquelle la pression est plus petite dans la grotte.

À l'inverse, l'activation de l'idée que des forces s'exercent entre l'eau et le rocher au-dessus de la grotte peut déclencher une modification du raisonnement de l'étudiant, dans la direction correcte, en produisant une complexification et un enrichissement du point de vue sur la situation proposée. Nous pensons que l'activation de cette idée positive peut être favorisée par la séquence ; elle est en tout cas un de ses objectifs.

b) Le questionnaire "Ballon dans l'eau"

Le questionnaire "Ballon dans l'eau" comporte deux questions.

Dans la première, on demande si l'eau exerce des forces sur 4 disques dessinés sur un ballon plongé dans l'eau, ces disques étant dessinés sur les parties supérieure et inférieure et sur les deux côtés du ballon. On demande aussi d'indiquer si ces forces éventuelles sont d'égale intensité ou, dans l'hypothèse où elles seraient différentes, de les ranger par ordre croissant.

Dans la seconde question, on demande si ces forces ont quelque chose à voir avec la poussée d'Archimède.

Le but est de vérifier si la séquence a eu un effet sur quelques-unes des difficultés relevées au début de l'étude sur les raisonnements des élèves et des étudiants, concernant les forces de pression agissant sur un objet immergé dans un liquide et l'interprétation de la poussée d'Archimède.

c) Le questionnaire "Seringue"

Le questionnaire "Seringue" est conçu pour tester si l'utilisation du modèle des balles de mousse a produit des modifications dans les idées des étudiants, concernant la compressibilité des liquides. En effet, les textes et les enseignants suggèrent très souvent que, au contraire des gaz, les liquides sont incompressibles. Il arrive aussi que l'acceptation de cette propriété présumée des liquides soit indiquée comme un objectif d'apprentissage pour les élèves, à saisir comme faisant partie de la bonne physique (par exemple Kariotoglou et Psillos 1993, 1995).

Or, s'il est vrai que pour la plupart des applications habituelles on peut bien négliger les petites déformations des liquides, il est vrai aussi que l'affirmation trop nette et rigide, parfois en termes de définition absolue, que "les liquides sont incompressibles", outre qu'elle est incorrecte physiquement, peut engendrer un blocage dans la représentation d'un mécanisme qui puisse expliquer les variations de pression dans un liquide et la transmission de ces variations. Rappelons qu'une conception spontanée très répandue est celle selon laquelle "si l'on pousse, ça s'écrase". Il s'agit d'une idée très élémentaire et ingénue, une sorte de "primitive phénoménologique" (les "p-prims" proposées par DiSessa 1981), mais qui peut bien être utilisée comme "bridge conception" (Clement J., Brown D., Zietsman A. 1989), pour construire une représentation plus complexe et correcte de la situation. Or l'idée que "ça s'écrase", qu'il y a des petites déformations dans le liquide, semble importante pour que se forme une image qualitative des actions locales et d'un mécanisme de leur transmission dans le fluide.

A la suite de ces considérations, nous avons introduit dans notre modèle, d'emblée, la déformabilité, très petite mais observable, comme une des propriétés des balles de mousse et du liquide.

Dans le questionnaire "Seringue", on considère une seringue pleine d'eau, fermée à son bout, et on demande si, en poussant assez fort sur le piston, la pression et volume de l'eau dans la seringue changent et, si oui, comment.

d) Le questionnaire "Casserole"

Un autre questionnaire a été proposé seulement dans l'expérimentation de 1999.

Ce questionnaire, "Casserole", est là pour répondre à une objection, à un doute qu'on peut avoir sur la présence possible d'effets négatifs collatéraux, dus à l'utilisation du modèle des balles de mousse. En effet, la proposition d'un modèle statique et mésoscopique de liquide pourrait engendrer chez les étudiants un oubli, une mise de côté, du point de vue microscopique, du modèle moléculaire de la matière, surtout de ses aspects cinétiques. Ce qui serait évidemment un résultat non souhaité et très négatif, compte tenu de l'importance en physique de l'acquisition d'un point de vue microscopique moléculaire et cinétique.

Ce souci nous a amenés à proposer ce questionnaire, où l'on considère une casserole, dans laquelle il y a de l'eau, et où l'on demande si les molécules de l'eau choquent les parois de la casserole et si, en chauffant l'eau, sa pression change et comment.

L'objectif n'est pas de comptabiliser les réponses brutes données, mais de vérifier dans quelle mesure les étudiants des deux groupes utilisent des justifications et des raisonnements en termes de cinétique moléculaire, à un niveau microscopique.

La réponse correcte à la seconde question (si, en chauffant l'eau, sa pression change et comment) est d'ailleurs difficile à obtenir ; elle demande un raisonnement subtil, avec plus d'un facteur à considérer, et sa saisie n'est pas ce qui est visé, dans le cadre de la présente recherche.

e) L'échantillon utilisé et l'organisation de l'évaluation

L'échantillon utilisé est le suivant.

Pour l'année 1999 :

Pre-test : au total 148 étudiants de première année de faculté scientifique, dont 71 du groupe qui suit la petite séquence didactique expérimentale, et 77 du groupe de contrôle.

Post-test : au total 142 étudiants de première année de faculté scientifique, dont 68 du groupe qui suit la petite séquence didactique expérimentale, et 74 du groupe de contrôle.

Pre-test : questionnaire «Récipients», passé en février 1999, juste avant la séquence.

Post-test : questionnaires "Poissons", "Ballon dans l'eau", "Seringue", "Casserole", passés en mars 1999.

Pour l'année 2000 :

Au total 263 étudiants de première année de faculté scientifique, dont 169 du groupe qui suit la séquence didactique expérimentale et 94 du groupe de contrôle.

Pre-test : questionnaire «Récipients», passé en février 2000, juste avant la séquence.

Post-test : questionnaires "Poissons", "Ballon dans l'eau", "Seringue", passés quatre semaines après la fin de la séquence.

Au total, dans les deux années 1999 et 2000 :

411 étudiants dans le pre-test, dont 240 du groupe expérimental, et 171 du groupe de contrôle.

405 étudiants dans le post-test, dont 237 du groupe expérimental, et 168 du groupe de contrôle.

7.2 Résultats du pre-test : Questionnaire "Récipients"

7.2.1 Résultats bruts

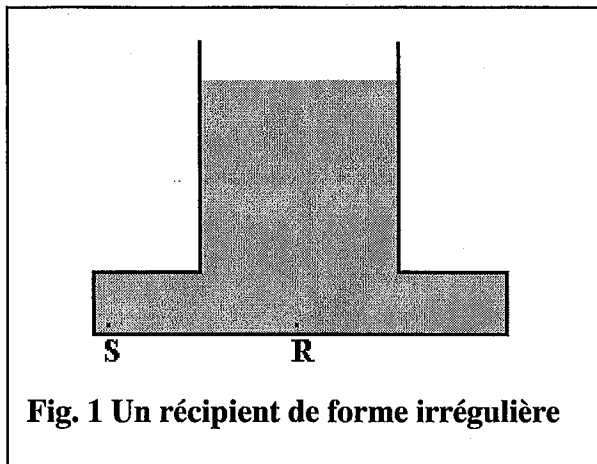
Question 1 : comparer la force exercée par l'eau sur le fond de trois récipients différents remplis au même niveau ☐ / ☐ \ ☐ / Réponse exacte : a) forces égales.

| Résultats du questionnaire "Récipients". Question 1. An 1999 | | | | | | | | | |
|--|---------------|-----|---|------|---|------|---|-----|-------|
| Groupe | Forces égales | | Force plus grande en <input type="checkbox"/> | | Force plus grande en / <input type="checkbox"/> \ | | Force plus grande en \ <input type="checkbox"/> / | | Total |
| expérimental | 32 | 45% | 1 | 1,4% | 3 | 4,2% | 35 | 49% | 71 |
| de contrôle | 34 | 44% | 1 | 1,3% | 3 | 3,9% | 39 | 51% | 77 |
| Total | 66 | 45% | 2 | 1,4% | 6 | 4% | 74 | 50% | 148 |

| Résultats du questionnaire "Récipients". Question 1. An 2000 | | | | | | | | | | |
|--|---------------|-----|---|------|---|------|---|-----|----|-------|
| Groupe | Forces égales | | Force plus grande en <input type="checkbox"/> | | Force plus grande en / <input type="checkbox"/> \ | | Force plus grande en \ <input type="checkbox"/> / | | NR | Total |
| expérimental | 43 | 25% | 1 | 0,6% | 13 | 7,7% | 110 | 65% | 2 | 169 |
| de contrôle | 24 | 26% | 3 | 3,2% | 6 | 6,4% | 60 | 64% | 1 | 94 |
| Total | 67 | 25% | 4 | 1,5% | 19 | 7% | 170 | 65% | 3 | 263 |

| Résultats du questionnaire "Récipients". Question 1. Ans 1999+ 2000 | | | | | | | | | | |
|---|---------------|-----|---|------|---|------|---|-----|----|-------|
| Groupe | Forces égales | | Force plus grande en <input type="checkbox"/> | | Force plus grande en / <input type="checkbox"/> \ | | Force plus grande en \ <input type="checkbox"/> / | | NR | Total |
| expérimental | 75 | 31% | 2 | 0,8% | 16 | 6,7% | 145 | 60% | 2 | 240 |
| de contrôle | 58 | 34% | 4 | 2,3% | 9 | 5,3% | 99 | 58% | 1 | 171 |
| Total | 133 | 32% | 6 | 1,5% | 25 | 6% | 244 | 59% | 3 | 411 |

Question 2 : Comparer la pression en deux points S, R dans un récipient plein d'eau.



Réponse exacte :
pressions égales en S et en R.

| Résultats du questionnaire "Récipients". Question 2. An 1999 | | | | | | | |
|--|-----------|-----|-----------|-----|-----------|------|-------|
| Groupe | p(S)=p(R) | | p(S)<p(R) | | p(S)>p(R) | | Total |
| expérimental | 53 | 75% | 14 | 20% | 4 | 5,6% | 71 |
| de contrôle | 59 | 77% | 13 | 17% | 5 | 6,5% | 77 |
| Total | 112 | 76% | 27 | 18% | 9 | 6,1% | 148 |

| Résultats du questionnaire "Récipients". Question 2. An 2000 | | | | | | | | |
|--|-----------|-----|-----------|-----|-----------|-----|----|-------|
| Groupe | p(S)=p(R) | | p(S)<p(R) | | p(S)>p(R) | | NR | Total |
| expérimental | 128 | 76% | 20 | 12% | 20 | 12% | 1 | 169 |
| de contrôle | 65 | 69% | 17 | 18% | 11 | 12% | 1 | 94 |
| Total | 193 | 73% | 37 | 14% | 31 | 12% | 2 | 263 |

| Résultats du questionnaire "Récipients". Question 2. Ans 1999+ 2000 | | | | | | | | |
|---|-----------|-----|-----------|-----|-----------|-----|----|-------|
| Groupe | p(S)=p(R) | | p(S)<p(R) | | p(S)>p(R) | | NR | Total |
| expérimental | 181 | 75% | 34 | 14% | 24 | 10% | 1 | 240 |
| de contrôle | 124 | 73% | 30 | 18% | 16 | 9% | 1 | 171 |
| Total | 305 | 74% | 64 | 16% | 40 | 10% | 2 | 411 |

7.2.2 Analyse des résultats et des justifications

Les réponses correctes à la question 1 sont nettement plus nombreuses en 1999 qu'en 2000 (45 % contre 26 %), mais elles sont presque identiques, chaque année, pour les deux groupes (on trouve $\chi^2=0,00025$, niveau $p=99\%$ pour l'an 2000 et $\chi^2=0,013$, niveau $p=91\%$ pour l'an 1999). Au total, pour les deux années considérées ensemble, il y a un peu plus de réponses correctes pour le groupe de contrôle (34% contre 31%), mais cette petite différence n'est pas statistiquement significative (on trouve $\chi^2=0,3$, niveau $p=58\%$). On voit que seulement un tiers des étudiants répondent correctement à la question 1, tandis que presque 60% pensent que la force exercée par l'eau est plus grande dans le cas du récipient avec plus d'eau.

En ce qui concerne la question 2, les pourcentages de réponses correctes sont presque identiques en 1999 et en 2000, tandis qu'on peut signaler une augmentation des réponses incorrectes du type $p(S)>p(R)$, avec une diminution des réponses $p(S)<p(R)$, mais il s'agit de petits nombres.

Dans la comparaison entre les deux groupes, sur la question 2, il y a une petite différence en faveur du groupe de contrôle en 1999 (76,6% contre 74,6%) et une petite différence, un peu plus marquée, en faveur du groupe expérimental en 2000 (75,7% contre 69,1%, un écart de 6,6% qui ne représente, d'ailleurs, que 4 ou 5 étudiants du groupe de contrôle). Au total, pour les deux années considérées ensemble, on trouve un petit avantage de réponses correctes pour le groupe expérimental (75% contre 73%). Aucune de ces différences entre les deux groupes (an 1999, an 2000, ans 1999 et 2000 ensemble) n'est significative au test du khi-deux. Pour la seule année 2000, on a $\chi^2=1,34$, niveau $p=25\%$. Pour les résultats totaux des deux années, on trouve une valeur $\chi^2=0,4$, ce qui correspond à un seuil de probabilité de 51%, nettement non significatif.

En conclusion, les pourcentages des réponses brutes sont équivalents dans les deux groupes, expérimental et de contrôle, les petites différences existantes n'étant en aucun cas statistiquement significatives. Ce résultat nous assure de l'équivalence des points de départ avant la séquence d'enseignement et nous donne aussi une indication importante sur les raisonnements des étudiants sur ce sujet, au niveau du premier cycle universitaire.

En ce qui concerne les justifications, une analyse détaillée a été faite dans le chapitre 5. Nous nous limitons ici à donner quelques indications sommaires, parmi les plus intéressantes pour la suite du texte sur l'évaluation de la séquence.

Pour la question 1, la justification largement majoritaire est basée sur l'équivalence "plus

d'eau = plus de force sur le fond", sur l'idée que le poids de l'eau, de toute l'eau qui est dans le récipient, agit sur le fond, qui doit la soutenir. Une autre typologie de justifications apparaît, concernant l'influence la pression de l'air, qui provoque sur la surface libre du récipient *c* une force plus grande que dans les autres récipients. Cette force est censée se transmettre sur le fond du récipient, en faisant que la force exercée par l'eau sur le fond du récipient devienne plus grande dans le cas du récipient *c*. On voit agir ici l'idée de transmission des forces, dans la direction verticale, vers le bas.

On retrouve la confusion engendrée par la définition pression = force/aire dans le cas des fluides, où souvent il n'est pas du tout clair de quelle force et de quelle aire on parle.

Pour la question 2, la règle bien connue et souvent répétée de la profondeur ou de la colonne de fluide au-dessus ne conduit pas toujours les étudiants à la réponse correcte. Au total, dans les deux années, un quart d'entre eux (26 %) donne une réponse fausse, $p(R) < p(S)$ ou $p(R) > p(S)$.

Certains étudiants répondent que la pression est plus forte en S, parce que là s'additionnent une pression verticale due à la « colonne d'eau au-dessus », comme en R, et une pression horizontale due à l'eau entre les deux points. D'autres pensent que la pression est plus forte en S parce que ce point est plus près des parois ou à cause du plus petit espace.

Les réponses sont beaucoup plus correctes quand on demande de comparer les pressions dans un seul récipient, que lorsqu'il s'agit de comparer des forces dans des récipients différents. Cela est peut-être dû à ce que, dans le premier cas, on est poussé à activer un *raisonnement local*, tandis que, dans le second, on peut se limiter à une *vision globale* de la situation.

La règle de la profondeur (ou hauteur) est mieux maîtrisée dans le cas d'un seul récipient, tandis qu'elle est plus souvent abandonnée quand il s'agit de comparer des récipients différents ou de raisonner sur les forces.

7.3 Post-test : Questionnaire "Poissons"

7.3.1 Résultats bruts

Question 1 : Comparer la pression pour deux poissons,
l'un en pleine mer et l'autre dans une grotte sous-marine.

| Résultats du questionnaire "Poissons". Question 1. An 1999 | | | | | | | | |
|--|----------------|-----|-------------------------------------|----|------------------------------------|-----|----|-------|
| Groupe | Pression égale | | Pression plus grande dans la grotte | | Pression plus grande en pleine mer | | NR | Total |
| expérimental | 51 | 75% | 4 | 6% | 13 | 19% | 0 | 68 |
| de contrôle | 50 | 68% | 6 | 8% | 18 | 24% | 0 | 74 |
| Total | 101 | 71% | 10 | 7% | 31 | 22% | 0 | 142 |

| Résultats du questionnaire "Poissons". Question 1. An 2000 | | | | | | | | |
|--|----------------|-----|-------------------------------------|----|------------------------------------|-----|----|-------|
| Groupe | Pression égale | | Pression plus grande dans la grotte | | Pression plus grande en pleine mer | | NR | Total |
| expérimental | 137 | 81% | 11 | 7% | 21 | 12% | 0 | 169 |
| de contrôle | 66 | 70% | 6 | 6% | 21 | 22% | 1 | 94 |
| Total | 203 | 77% | 17 | 6% | 42 | 16% | 1 | 263 |

| Résultats du questionnaire "Poissons". Question 1. Ans 1999+2000 | | | | | | | | |
|--|----------------|-----|-------------------------------------|----|------------------------------------|-----|----|-------|
| Groupe | Pression égale | | Pression plus grande dans la grotte | | Pression plus grande en pleine mer | | NR | Total |
| expérimental | 188 | 79% | 15 | 6% | 34 | 14% | 0 | 237 |
| de contrôle | 116 | 69% | 12 | 7% | 39 | 23% | 1 | 168 |
| Total | 304 | 75% | 27 | 7% | 73 | 18% | 1 | 405 |

Question 2 : En bas de la grotte, l'eau exerce-t-elle une force sur le rocher et le rocher exerce-t-il une force sur l'eau ?

| Résultats du questionnaire "Poissons". Question 2. An 1999 | | | | | |
|--|--|------|-----------|------|-------|
| | Force de l'eau sur le rocher en bas de la grotte | | | | |
| | oui | | Non ou NR | | Total |
| Groupe expérimental | 68 | 100% | 0 | 0,0% | 68 |
| Groupe de contrôle | 69 | 93% | 5 | 6,8% | 74 |
| Total | 137 | 96% | 5 | 3,5% | 142 |

| Résultats du questionnaire "Poissons". Question 2. An 1999 | | | | | |
|---|---|-----|-----------|-------|-------|
| | Force du rocher sur l'eau en bas de la grotte | | | | |
| | oui | | Non ou NR | | Total |
| Groupe expérimental | 64 | 94% | 4 | 5,9% | 68 |
| Groupe de contrôle | 57 | 77% | 17 | 23% | 74 |
| Total | 121 | 85% | 21 | 14,8% | 142 |

| Résultats du questionnaire "Poissons". Question 2. An 2000 | | | | | | | |
|---|--|-----|-----|----|----|----|-------|
| | Force de l'eau sur le rocher en bas de la grotte | | | | | | |
| | oui | | Non | | NR | | Total |
| Groupe expérimental | 165 | 98% | 1 | 1% | 3 | 2% | 169 |
| Groupe de contrôle | 85 | 90% | 5 | 5% | 4 | 4% | 94 |
| Total | 250 | 95% | 6 | 2% | 7 | 3% | 263 |

| Résultats du questionnaire "Poissons". Question 2. An 2000 | | | | | | | |
|---|---|-----|-----|-----|----|----|-------|
| | Force du rocher sur l'eau en bas de la grotte | | | | | | |
| | oui | | Non | | NR | | Total |
| Groupe expérimental | 159 | 94% | 3 | 2% | 7 | 4% | 169 |
| Groupe de contrôle | 76 | 81% | 12 | 13% | 6 | 6% | 94 |
| Total | 235 | 89% | 15 | 6% | 13 | 5% | 263 |

| Résultats du questionnaire "Poissons". Question 2. Ans 1999+2000 | | | | | | | |
|---|--|-----|-----|----|----|----|-------|
| | Force de l'eau sur le rocher en bas de la grotte | | | | | | |
| | oui | | Non | | NR | | Total |
| Groupe expérimental | 233 | 98% | 1 | 0% | 3 | 1% | 237 |
| Groupe de contrôle | 154 | 92% | 7 | 4% | 7 | 4% | 168 |
| Total | 387 | 96% | 8 | 2% | 10 | 2% | 405 |

| Résultats du questionnaire "Poissons". Question 2. Ans 1999+2000 | | | | | | | |
|---|---|-----|-----|-----|----|----|-------|
| | Force du rocher sur l'eau en bas de la grotte | | | | | | |
| | oui | | Non | | NR | | Total |
| Groupe expérimental | 223 | 94% | 5 | 2% | 9 | 4% | 237 |
| Groupe de contrôle | 133 | 79% | 21 | 13% | 14 | 8% | 168 |
| Total | 356 | 88% | 26 | 6% | 23 | 6% | 405 |

Question 3 : En haut de la grotte l'eau exerce-t-elle une force sur le rocher et le rocher exerce-t-il une force sur l'eau ?

| Résultats du questionnaire "Poissons". Question 3. An 1999 | | | | | |
|--|---|-----|-----------|-----|-------|
| | Force de l'eau sur le rocher en haut de la grotte | | | | |
| | oui | | Non ou NR | | Total |
| Groupe expérimental | 61 | 90% | 7 | 10% | 68 |
| Groupe de contrôle | 64 | 86% | 10 | 14% | 74 |
| Total | 125 | 88% | 17 | 12% | 142 |

| Résultats du questionnaire "Poissons". Question 3. An 1999 | | | | | |
|--|--|-----|-----------|-----|-------|
| | Force du rocher sur l'eau en haut de la grotte | | | | |
| | oui | | Non ou NR | | Total |
| Groupe expérimental | 52 | 76% | 16 | 24% | 68 |
| Groupe de contrôle | 45 | 61% | 29 | 39% | 74 |
| Total | 97 | 68% | 45 | 32% | 142 |

| Résultats du questionnaire "Poissons". Question 3. An 2000 | | | | | | | |
|--|---|-----|-----|-----|----|----|-------|
| | Force de l'eau sur le rocher en haut de la grotte | | | | | | |
| | oui | | Non | | NR | | Total |
| Groupe expérimental | 143 | 85% | 13 | 8% | 13 | 8% | 169 |
| Groupe de contrôle | 76 | 81% | 12 | 13% | 6 | 6% | 94 |
| Total | 219 | 83% | 25 | 10% | 19 | 7% | 263 |

| Résultats du questionnaire "Poissons". Question 3. An 2000 | | | | | | | |
|--|--|-----|-----|------|----|------|-------|
| | Force du rocher sur l'eau en haut de la grotte | | | | | | |
| | oui | | Non | | NR | | Total |
| Groupe expérimental | 140 | 83% | 13 | 7,7% | 16 | 9,5% | 169 |
| Groupe de contrôle | 68 | 72% | 16 | 17% | 10 | 11% | 94 |
| Total | 208 | 79% | 29 | 11% | 26 | 10% | 263 |

| Résultats du questionnaire "Poissons". Question 3. Ans 1999+2000 | | | | | | | |
|---|---|-----|-----|-----|----|----|-------|
| | Force de l'eau sur le rocher en haut de la grotte | | | | | | |
| | oui | | Non | | NR | | Total |
| Groupe expérimental | 204 | 86% | 20 | 8% | 13 | 5% | 237 |
| Groupe de contrôle | 140 | 83% | 18 | 11% | 10 | 6% | 168 |
| Total | 344 | 85% | 38 | 9% | 23 | 6% | 405 |

| Résultats du questionnaire "Poissons". Question 3. Ans 1999+2000 | | | | | | | |
|---|--|-----|-----|-----|----|-----|-------|
| | Force du rocher sur l'eau en haut de la grotte | | | | | | |
| | oui | | Non | | NR | | Total |
| Groupe expérimental | 192 | 81% | 23 | 10% | 22 | 9% | 237 |
| Groupe de contrôle | 113 | 67% | 32 | 19% | 23 | 14% | 168 |
| Total | 305 | 75% | 55 | 14% | 45 | 11% | 405 |

7.3.2 Analyse des résultats et des justifications

Question 1

Les résultats globaux des deux années montrent qu'il y a une différence entre les réponses des deux groupes à la question 1 : 79 % de réponses correctes du groupe expérimental contre 69 % de l'autre groupe. Le test du khi deux, comparant le nombre de réponses correctes avec celui des réponses non correctes considérées ensemble, donne une valeur $\chi^2=5,5$, soit une différence qui est *significative au niveau 1,4 %*.

Cette amélioration marque un succès modéré de la séquence.

Ce résultat apparaît encore plus intéressant, si l'on considère que dans le groupe de contrôle on a 69 % de réponses correctes et que, avec un échantillon encore plus large, de 213 étudiants, nous avons trouvé sur cette question un pourcentage de 67% de réponses correctes (voir par. 5.2, tableau 2). Donc la séquence est censée devoir agir sur une minorité d'environ 31-33% d'étudiants qui, en général, ne répondent pas correctement. Le pourcentage de 79% de réponses correctes dans le groupe expérimental peut être considéré alors comme donnant une amélioration relative de $(79-69)/(100-69)=32\%$ (qui devient 36% si l'on calcule avec le 67% de l'échantillon plus large), ce qui représente un résultat assez bon, compte tenu aussi de la brièveté de l'intervention didactique expérimentale.

Si l'on analyse les résultats de chaque année séparément, on trouve qu'en 1999 l'avantage de réponses correctes du groupe expérimental est plus faible (75% contre 68% du groupe de contrôle), et n'est pas significatif au test du khi deux ($\chi^2 = 1,0$; niveau $p=33\%$).

Pour l'année 2000, l'avantage du groupe expérimental est plus marqué : 81% contre 70% du groupe de contrôle, ce qui donne une valeur $\chi^2=4,0$ significative avec un seuil de probabilité $p=4,4\%$.

On peut penser qu'un perfectionnement apporté au déroulement de la séquence a pu faire ressortir un effet positif plus marqué : en 2000, on a ajouté à la séquence une séance finale de débats en petits groupes d'étudiants.

Questions 2 et 3

On trouve une différence significative entre le groupe expérimental et celui de contrôle sur la question concernant l'existence des forces exercées par le rocher sur l'eau en haut de la grotte.

Pour les résultats globaux des deux années, on a obtenu 81% de réponses correctes dans le groupe expérimental contre 67% du groupe témoin. La valeur du χ^2 , calculée avec un tableau à deux entrées (réponse correcte « oui » contre réponses « non » et absence de réponse considérées ensemble), est $\chi^2=10$; la différence est donc significative au niveau $p=0,2\%$. Si l'on ne considère pas les non-réponses, ces données changent un peu : on a 89% de réponses correctes dans le groupe expérimental contre 78% du groupe témoin, ce qui donne une valeur $\chi^2=8,7$ et donc encore une différence, au niveau $p=0,3\%$.

Il y a une différence significative, en faveur du groupe expérimental, aussi pour chaque année considérée séparément: $\chi^2=4,0$ et niveau $p=4,5\%$ pour l'an 2000, $\chi^2=4,0$ et niveau $p=4,5\%$ pour l'an 1999.

On trouve un avantage du groupe expérimental aussi sur la question concernant l'existence des forces exercées par le rocher sur l'eau en bas de la grotte : 94% de réponses correctes dans le groupe expérimental contre 79% du groupe témoin, pour les résultats globaux des deux années (ces pourcentages deviennent 98% contre 86% si l'on ne considère pas les non-réponses). La différence est significative au niveau 0,1%, mais, dans ce cas, les très petit nombre de réponses négatives (5 et 21) rend le résultat peu intéressant et statistiquement moins fiable.

Sur cet aspect, la courte séquence d'enseignement, centrée en effet sur les forces réciproques des balles de mousse entre elles et avec la paroi ou la main, pourrait bien avoir agi efficacement.

Justifications

Dans leurs justifications, plusieurs étudiants du groupe expérimental font appel au modèle des balles de mousse (22, soit 13%), et bon nombre d'entre eux font un raisonnement en termes d'actions horizontales (21, soit 12% contre 3, soit 3% dans le groupe de contrôle), parfois moyennant le modèle proposé : *«La pression est égale ... si on considère le modèle des balles de mousse, celle à l'extrême gauche subit des forces, qui se répètent de boule en boule jusqu'à celles de la grotte»* (00EN47).

Parmi ceux qui ont donné la réponse correcte, 29 étudiants du groupe expérimental évoquent la force exercée par le plafond de la grotte sur l'eau pour justifier que la pression soit égale pour les deux poissons, même s'ils n'ont pas la même hauteur d'eau au-dessus d'eux : *«La pression est égale, car la différence de hauteur est compensée par la force qu'exerce la paroi»*. *«La force exercée par la paroi supérieure de la grotte sur l'eau est égale à la force qui serait exercée s'il y avait eu de l'eau au-dessus à la place de la roche»*. Ces commentaires typés suggèrent qu'une avancée notable s'est produite, sur la base du modèle, chez certains étudiants.

Il faut dire qu'on trouve aussi 3 étudiants qui évoquent le modèle des balles de mousse, mais donnent une réponse erronée, "pression plus grande en pleine mer" ; ce qui montre que, si l'on n'a pas réussi à activer un raisonnement systémique complet, les balles de mousse peuvent être aussi assimilées dans le cadre de la conception préexistante du « poids du fluide au-dessus », en les substituant simplement à la colonne d'eau, comme des "boîtes sur la tête".

L'évocation de la force exercée par le rocher sur l'eau au plafond de la grotte peut, elle aussi, accompagner une réponse erronée, cette fois du type "pression plus grande dans la grotte" : c'est le cas de 5 étudiants, selon lesquels cette force du rocher s'ajoute à celle de l'eau, engendrant une pression plus grande qu'à l'extérieur.

Dans le groupe de contrôle, on trouve encore une minorité importante (23%, contre 14% du groupe expérimental), qui, même après enseignement, considère que la pression est plus grande en pleine mer, ce qui confirme la forte persistance du raisonnement basé sur *le poids du fluide au-dessus*.

7.3.3 Quelques conclusions

Il y a une différence entre les réponses des deux groupes à la question 1 : 79 % de réponses correctes du groupe expérimental contre 69 % du groupe de contrôle. Le test du khi deux, comparant le nombre de réponses correctes avec celui des toutes les réponses non correctes considérées ensemble, donne une valeur $\chi^2=5,5$, soit une différence qui est *significative au niveau* 1,4 %. Cette amélioration marque un succès modéré de la séquence.

Les réponses aux questions 2 et 3 montrent que les étudiants du groupe expérimental envisagent plus fréquemment que ceux du groupe de contrôle l'existence de forces exercées par le rocher sur l'eau en haut de la grotte (81% contre 67%). Le test χ^2 montre que cette différence est statistiquement significative, au niveau 0,2%.

Dans leurs justifications, plusieurs étudiants du groupe expérimental font appel au modèle des balles de mousse (22, soit 13%) et bon nombre d'entre eux font un raisonnement en termes d'actions horizontales (21, soit 12%, contre 3% dans le groupe contrôle). Parmi ceux qui ont donné la réponse correcte, 29 étudiants évoquent la force exercée par le plafond de la grotte sur l'eau pour justifier que la pression est égale pour les deux poissons, même s'ils ont des hauteurs différentes d'eau au-dessus d'eux. Ces commentaires suggèrent qu'une avancée notable s'est produite, sur la base du modèle, chez certains étudiants.

7.4 Post-test : Questionnaire "Ballon dans l'eau"

Un ballon de foot-ball est tenu immergé dans l'eau. Quatre disques identiques y sont dessinés, en haut A, en bas B, à droite C, à gauche D.

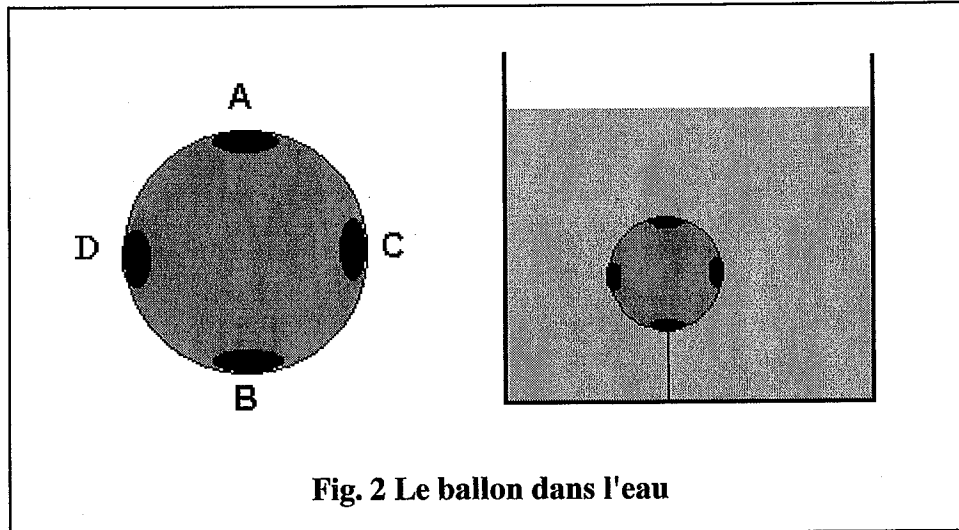


Fig. 2 Le ballon dans l'eau

Question 1

L'eau exerce-t-elle une force sur A, B, C, D ?

Si oui, dites si elles sont de la même intensité ou bien rangez-les par ordre croissant.

Question 2

Ces forces ont-elles quelque chose à voir avec la poussée d'Archimède ?

7.4.1 Résultats bruts : question 1

| Questionnaire "Ballon dans l'eau". An 1999. Question 1 : L'eau exerce-t-elle une force sur les disques A, B, C, D ? Si oui, dites si elles sont de la même intensité ou bien rangez-les par ordre croissant. | | | | | |
|---|---|---------------------|------|--------------------|------|
| | Réponse | Groupe expérimental | | Groupe de contrôle | |
| <i>a</i> | correcte | 33 | 49% | 27 | 36% |
| <i>b</i> | $F(B) > F(A) ; F(C) = F(D)$ | 1 | 1% | 6 | 8% |
| <i>c</i> | $F(B) > F(A) = F(C) = F(D)$ | 6 | 9% | 6 | 8% |
| <i>d</i> | Seules $F(B) > F(A)$ | 4 | 6% | 6 | 8% |
| <i>e</i> | 4 forces égales | 9 | 13% | 9 | 12% |
| <i>f</i> | Seule $F(B)$ | 2 | 3% | 6 | 8% |
| <i>g</i> | $F(A) > F(C) = F(D) > F(B)$ ou $F(A)$ plus grande | 1 | 1% | 1 | 1% |
| | autres | 10 | 15% | 8 | 11% |
| | Non réponses | 2 | 3% | 5 | 7% |
| | Total | 68 | 100% | 74 | 100% |

Questionnaire "Ballon dans l'eau". An 2000.

Question 1 : L'eau exerce-t-elle une force sur les disques A, B, C, D ? Si oui, dites si elles sont de la même intensité ou bien rangez-les par ordre croissant.

| | Réponse | Groupe expérimental | | Groupe de contrôle | |
|----------|--|---------------------|------|--------------------|------|
| <i>a</i> | correcte | 98 | 58% | 31 | 33% |
| <i>b</i> | $F(B) > F(A) ; F(C) = F(D)$ | 10 | 6% | 11 | 12% |
| <i>c</i> | $F(B) > F(A) = F(C) = F(D)$ | 4 | 2% | 4 | 4% |
| <i>d</i> | Seules $F(B) > F(A)$ | 10 | 6% | 6 | 6% |
| <i>e</i> | 4 forces égales | 12 | 7% | 16 | 17% |
| <i>f</i> | Seule $F(B)$ | 1 | 1% | 4 | 4% |
| <i>g</i> | $F(A) > F(C) = F(D) > F(B)$ ou $F(A)$ plus grande | 3 | 2% | 5 | 5% |
| | autres | 20 | 12% | 17 | 18% |
| | Non réponses | 11 | 7% | 0 | 0% |
| | Total | 169 | 100% | 94 | 100% |

| Questionnaire "Ballon dans l'eau". Ans 1999+2000. | | | | | |
|--|--|---------------------|------|--------------------|------|
| Question 1 : L'eau exerce-t-elle une force sur les disques A, B, C, D ? Si oui, dites si elles sont de la même intensité ou bien rangez-les par ordre croissant. | | | | | |
| | Réponse | Groupe expérimental | | Groupe de contrôle | |
| <i>a</i> | correcte | 131 | 55% | 58 | 35% |
| <i>b</i> | $F(B) > F(A) ; F(C) = F(D)$ | 11 | 5% | 17 | 10% |
| <i>c</i> | $F(B) > F(A) = F(C) = F(D)$ | 10 | 4% | 10 | 6% |
| <i>d</i> | Seules $F(B) > F(A)$ | 14 | 6% | 12 | 7% |
| <i>e</i> | 4 forces égales | 21 | 9% | 25 | 15% |
| <i>f</i> | Seule $F(B)$ | 3 | 1% | 10 | 6% |
| <i>g</i> | $F(A) > F(C) = F(D) > F(B)$ ou $F(A)$ plus grande | 4 | 2% | 6 | 4% |
| | autres | 30 | 13% | 25 | 15% |
| | Non réponses | 13 | 5% | 5 | 3% |
| | Total | 237 | 100% | 168 | 100% |

7.4.2 Question 1 : analyse des résultats

Il y a une différence très nette, en faveur du groupe expérimental, pour l'an 2000. Les pourcentages de réponses correctes (*a*) ou de réponses correctes ou presque (*a+b*) sont largement meilleurs chez le groupe expérimental : 58% contre 33% dans le groupe de contrôle, et 64% contre 45% respectivement. Le test du khi-deux indique que cette différence est significative à un niveau inférieur ($p < 0,1\%$) dans le deux cas.

| Ballon dans l'eau. An 2000 | | | |
|----------------------------|-----------------------------|-----------------|-------|
| Question 1 | | | |
| | Réponses correctes <i>a</i> | Autres réponses | Total |
| Exp | 98 | 60 | 158 |
| Contrôle | 31 | 63 | 94 |
| Total | 129 | 123 | 252 |

Khi deux = 19,9

Niveau $p = 0,001\%$

| Ballon dans l'eau. An 2000 | | | |
|----------------------------|-----------|-----------|-------|
| Question 1 | | | |
| | Correctes | Non | |
| | a+b | correctes | Total |
| Exp | 108 | 50 | 158 |
| Contrôle | 42 | 52 | 94 |
| Total | 150 | 102 | 252 |

Khi deux = 13,7

Niveau $p = 0,021\%$

En regroupant les réponses des étudiants qui considèrent l'existence de deux forces au-dessus et au-dessous du ballon, avec la seconde plus grande que la première, soit $F_B > F_A$, on retrouve encore un avantage remarquable du groupe expérimental, 74% contre 56%, une différence statistiquement significative à un niveau $p < 0,1\%$.

On peut bien conclure que la séquence a agi de façon très efficace sur la compréhension des aspects concernant l'existence et les caractéristiques des forces de pression dans un liquide.

Ces différences ne sont pas présentes, sinon en mesure beaucoup plus faible, pour l'an 1999. Il y a là aussi un petit avantage pour le groupe expérimental, mais il n'est pas significatif.

On trouve néanmoins des différences significatives, si l'on regroupe les résultats des deux années.

| Ballon dans l'eau 1999+2000 | | | |
|-----------------------------|-----------|-----------|-------|
| Question 1 | | | |
| | Correctes | Non | |
| | a+b | correctes | Total |
| Exp | 142 | 82 | 224 |
| Contrôle | 75 | 88 | 163 |
| Total | 217 | 170 | 387 |

Khi deux = 11,6

Niveau $p = 0,07\%$

7.4.3 Résultats bruts : question 2

| Questionnaire "Ballon dans l'eau". An 1999. | | | | | |
|--|---|---------------------|------|--------------------|------|
| Question 2 : Ces forces de pression ont quelque chose à voir avec la poussée d'Archimède ? | | | | | |
| | La poussée d'Archimède | Groupe expérimental | | Groupe de contrôle | |
| <i>a, b</i> | n'a rien à voir, est une autre force qui s'ajoute aux forces de pression | 25 | 37% | 24 | 32% |
| <i>c, d</i> | est la force en bas (en B), a à voir avec la seule force en B | 10 | 15% | 23 | 31% |
| <i>e</i> | est la résultante des forces de pression, est un effet de ces forces | 8 | 12% | 6 | 8% |
| <i>f</i> | réponse "oui", mais sans justifications ou avec justifications génériques, pas claires ou non pertinentes | 13 | 19% | 13 | 18% |
| | autres | 3 | 4% | 0 | 0% |
| | Non réponses | 9 | 13% | 8 | 11% |
| | Total | 68 | 100% | 74 | 100% |

| Questionnaire "Ballon dans l'eau". An 2000. | | | | | |
|--|---|---------------------|------|--------------------|------|
| Question 2 : Ces forces de pression ont quelque chose à voir avec la poussée d'Archimède ? | | | | | |
| | La poussée d'Archimède | Groupe expérimental | | Groupe de contrôle | |
| <i>a, b</i> | n'a rien à voir, est une autre force qui s'ajoute aux forces de pression | 38 | 22% | 23 | 24% |
| <i>c, d</i> | est la force en bas (en B), a à voir avec la seule force en B | 46 | 27% | 23 | 24% |
| <i>e</i> | est la résultante des forces de pression, est un effet de ces forces | 23 | 14% | 12 | 13% |
| <i>f</i> | réponse "oui", mais sans justifications ou avec justifications génériques, pas claires ou non pertinentes | 41 | 24% | 23 | 24% |
| | autres | 4 | 2% | 4 | 4% |
| | Non réponses | 17 | 10% | 9 | 10% |
| | Total | 169 | 100% | 94 | 100% |

| Questionnaire "Ballon dans l'eau". Ans 1999+2000. | | | | | |
|--|---|---------------------|------|--------------------|------|
| Question 2 : Ces forces de pression ont quelque chose à voir avec la poussée d'Archimède ? | | | | | |
| | La poussée d'Archimède | Groupe expérimental | | Groupe de contrôle | |
| <i>a, b</i> | n'a rien à voir, est une autre force qui s'ajoute aux forces de pression | 63 | 27% | 47 | 28% |
| <i>c, d</i> | est la force en bas (en B), a à voir avec la seule force en B | 56 | 24% | 46 | 27% |
| <i>e</i> | est la résultante des forces de pression, est un effet de ces forces | 31 | 13% | 18 | 11% |
| <i>f</i> | réponse "oui", mais sans justifications ou avec justifications génériques, pas claires ou non pertinentes | 54 | 23% | 36 | 21% |
| | autres | 7 | 3% | 4 | 2% |
| | Non réponses | 26 | 11% | 17 | 10% |
| | Total | 237 | 100% | 168 | 100% |

7.4.4 Question 2 : analyse des résultats

Les réponses correctes du groupe expérimental sont plus nombreuses, mais la différence est petite, et le test du khi-deux ne donne pas des valeurs significatives.

En regroupant les réponses *e+f* comme correctes, le calcul du khi-deux donne un niveau $p=42\%$ pour l'an 1999, un niveau $p=89\%$ pour l'an 2000, et un niveau $p=32\%$ pour les deux ans cumulés. En considérant les seules réponses *e* comme correctes, le calcul du khi-deux donne un niveau $p=43\%$ pour l'an 1999, $p=83\%$ pour l'an 2000, et $p=45\%$ pour les deux ans cumulés.

Une analyse plus approfondie des réponses *f*, mises en relation avec les réponses du même étudiant à la question 1, comme déjà fait dans le chapitre 5, permet de les partager entre celles certainement non correctes et celle encore douteuses. Cette distinction fait apparaître un avantage plus sensible en faveur du groupe expérimental, mais cet avantage demeure encore trop petit et les réponses trop incertaines.

La seule conclusion possible est qu'il n'y a pas de différence significative entre les deux groupes, et donc que la séquence n'a pas eu d'effets importants en ce qui concerne une meilleure compréhension de la nature de la poussée d'Archimède.

Même si un certain avantage apparaît pour le groupe expérimental, les données à disposition ne permettent pas de tirer d'autres conclusions suffisamment sûres.

Ce résultat confirme la difficulté sur ce point, déjà mise en évidence au chapitre 5, et montre aussi qu'une amélioration très nette dans la compréhension des caractéristiques des forces de pression agissant sur un objet immergé dans un liquide, comme celle qui s'est manifestée dans le groupe expérimental de l'an 2000, ne conduit pas spontanément à une mise en relation efficace entre ces forces et la poussée d'Archimède.

En effet, la grande majorité des étudiants continue à considérer la poussée d'Archimède comme étant une force distincte de celles de pression, de nature et d'origine différentes. Souvent cette distinction est évoquée explicitement. Plusieurs étudiants soulignent la nature "globale" de la poussée d'Archimède, considérée comme une force de volume, agissant sur tout le ballon, appliquée au centre du ballon et dirigée vers le haut, en contraste avec les forces de pression, qui sont des forces de contact, "locales", agissant sur chaque petite partie du ballon et dirigées aussi vers le bas : contraste si radical que la connexion entre les deux phénomènes devient difficile à saisir.

La très forte similitude des pourcentages des réponses du groupe expérimental et du groupe de contrôle, en particulier dans l'an 2000, peut être considérée comme une confirmation a posteriori de l'équivalence du point de départ des deux groupes.

7.5 Post-test : Questionnaire "Seringue"

Questions 1 et 2

On ferme le bout d'une seringue pleine d'eau.

Si l'on pousse assez fort sur le piston, la pression de l'eau dans la seringue augmente-t-elle, diminue-t-elle ou reste-t-elle inchangée ?

Et le volume augmente-t-il, diminue-t-il ou reste-t-il inchangé ?

7.5.1 Résultats bruts

| Questionnaire "Seringue". An 1999. | | | | | |
|--|---|---------------------|------|--------------------|------|
| Question 1 e 2 | | | | | |
| Si l'on pousse assez fort sur le piston, la pression de l'eau dans la seringue augmente-t-elle, diminue-t-elle ou reste-t-elle inchangée ? | | | | | |
| Et le volume augmente-t-il, diminue-t-il ou reste-t-il inchangé ? | | | | | |
| | Réponse | Groupe expérimental | | Groupe de contrôle | |
| <i>a</i> | $p \uparrow \quad V \downarrow$ | 16 | 24% | 21 | 28% |
| <i>b</i> | $p \uparrow \quad V \downarrow \cong$ ou $p \uparrow \cong V \downarrow \cong$ | 22 | 32% | 6 | 8% |
| <i>e</i> | $p \uparrow \quad V =$ | 22 | 32% | 36 | 49% |
| <i>d</i> | $p = \quad V =$ | 7 | 10% | 8 | 11% |
| <i>e</i> | $p = \quad V \downarrow$ ou $V \downarrow \cong$ | 1 | 1,5% | 1 | 1,4% |
| | autres | 0 | 0% | 1 | 1,4% |
| | incomplètes ou pas claires | 0 | 0% | 1 | 1,4% |
| | Total réponses | 68 | 100% | 74 | 100% |

Questionnaire "Seringue". An 2000.

Question 1 e 2

Si l'on pousse assez fort sur le piston, la pression de l'eau dans la seringue
augmente-t-elle, diminue-t-elle ou reste-t-elle inchangée ?

Et le volume augmente-t-il, diminue-t-il ou reste-t-il inchangé ?

| | Réponse | Groupe expérimental | | Groupe de contrôle | |
|----------|---|---------------------|------|--------------------|------|
| <i>a</i> | $p \uparrow \quad V \downarrow$ | 31 | 18% | 22 | 23% |
| <i>b</i> | $p \uparrow \quad V \downarrow \cong$ ou $p \uparrow \cong V \downarrow \cong$ | 53 | 31% | 13 | 14% |
| <i>e</i> | $p \uparrow \quad V =$ | 62 | 37% | 41 | 44% |
| <i>d</i> | $p = \quad V =$ | 14 | 8% | 14 | 15% |
| <i>e</i> | $p = \quad V \downarrow$ ou $V \downarrow \cong$ | 3 | 2% | 2 | 2% |
| <i>f</i> | autres | 3 | 2% | 0 | 0% |
| | incomplètes ou pas claires | 3 | 2% | 2 | 2% |
| | Total réponses | 169 | 100% | 94 | 100% |

Questionnaire "Seringue". Ans 1999+2000.

Question 1 e 2

Si l'on pousse assez fort sur le piston, la pression de l'eau dans la seringue
augmente-t-elle, diminue-t-elle ou reste-t-elle inchangée ?

Et le volume augmente-t-il, diminue-t-il ou reste-t-il inchangé ?

| | Réponse | Groupe expérimental | | Groupe de contrôle | |
|----------|---|---------------------|------|--------------------|------|
| <i>a</i> | $p \uparrow \quad V \downarrow$ | 51 | 21% | 43 | 26% |
| <i>b</i> | $p \uparrow \quad V \downarrow \cong$ ou $p \uparrow \cong V \downarrow \cong$ | 75 | 31% | 19 | 11% |
| <i>e</i> | $p \uparrow \quad V =$ | 84 | 35% | 77 | 46% |
| <i>d</i> | $p = \quad V =$ | 21 | 9% | 22 | 13% |
| <i>e</i> | $p = \quad V \downarrow$ ou $V \downarrow \cong$ | 4 | 2% | 3 | 2% |
| <i>f</i> | autres | 3 | 1% | 1 | 1% |
| | incomplètes ou pas claires | 3 | 1% | 3 | 2% |
| | Total réponses | 241 | 100% | 168 | 100% |

7.5.2 Analyse des résultats et des justifications

On observe qu'il y a une évidente différence entre les deux groupes. Les étudiants du groupe expérimental envisagent plus fréquemment que ceux du groupe de contrôle des petites diminutions (indiquées sur les tableaux par le symbole $V \downarrow \approx$), tandis que ceux qui considèrent que le volume est inchangé sont moins nombreux. Cette différence se remarque pour chacune des deux années.

En regroupant les réponses en deux catégories seulement, celles qui indiquent que les étudiants envisagent une diminution de volume et celles qui suggèrent qu'ils considèrent que le volume ne change pas, on obtient les tableaux suivants :

| Questionnaire "Seringue". An 2000. | | | |
|------------------------------------|-----|-----------|-------|
| | V = | V diminue | Total |
| Groupe exp. | 76 | 89 | 165 |
| Groupe de contrôle | 55 | 37 | 92 |
| Total | 131 | 126 | 257 |

Khi deux = 4,5
Niveau $p = 3,4\%$

| Questionnaire "Seringue". An 1999. | | | |
|------------------------------------|-----|-----------|-------|
| | V = | V diminue | Total |
| Groupe exp. | 29 | 39 | 68 |
| Groupe de contrôle | 44 | 28 | 72 |
| Total | 73 | 67 | 140 |

Khi deux = 4,8
Niveau $p = 2,8\%$

| Questionnaire "Seringue". Ans 1999+2000. | | | |
|--|-----|-----------|-------|
| | V = | V diminue | Total |
| Groupe exp. | 105 | 128 | 233 |
| Groupe de contrôle | 99 | 65 | 164 |
| Total | 204 | 193 | 397 |

Khi deux = 9,0
Niveau $p = 0,3\%$

On trouve toujours des différences significatives, à des niveaux $p=4,8\%$, $p=3,4\%$, $p=0,3\%$, respectivement pour les années 1999, 2000 et pour les deux ans cumulés.

En regroupant les réponses en trois catégories, selon que les étudiants considèrent que le volume ne change pas, répondent qu'il y a une diminution de volume, mais très petite, ou répondent qu'il y a une diminution de volume, sans autre précision, on obtient le tableau suivant :

| Questionnaire "Seringue". An 2000. | | | | |
|------------------------------------|-----|------------------|-----|-------|
| | V = | V ↓ _≅ | V ↓ | Total |
| Groupe exp. | 76 | 57 | 32 | 165 |
| Groupe de contrôle | 55 | 13 | 24 | 92 |
| Total | 131 | 70 | 56 | 257 |

Khi deux = 12,4
Niveau $p = 0,20\%$

| Questionnaire "Seringue". An 1999. | | | | |
|------------------------------------|-----|------------------|-----|-------|
| | V = | V ↓ _≅ | V ↓ | Total |
| Groupe exp. | 29 | 22 | 17 | 68 |
| Groupe de contrôle | 44 | 6 | 22 | 72 |
| Total | 73 | 28 | 39 | 140 |

Khi deux = 12,8
Niveau $p = 0,17\%$

| Questionnaire "Seringue". Ans 1999+2000. | | | | |
|--|-----|------------------|-----|-------|
| | V = | V ↓ _≅ | V ↓ | Total |
| Groupe exp. | 95 | 79 | 49 | 223 |
| Groupe de contrôle | 99 | 19 | 66 | 184 |
| Total | 194 | 98 | 115 | 407 |

Khi deux = 36,0
Niveau $p < 0,01\%$

En regroupant les réponses en deux catégories seulement, celles qui envisagent une diminution de volume très petite et toutes les autres, on obtient les tableaux suivants :

| Questionnaire "Seringue". An 2000. | | | |
|------------------------------------|------------------|-----------------|-------|
| | V ↓ _≅ | autres réponses | Total |
| Groupe experimental | 57 | 109 | 166 |
| Groupe de contrôle | 13 | 79 | 92 |
| Total | 70 | 188 | 258 |

Khi deux = 12,2
Niveau $p = 0,05\%$

| Questionnaire "Seringue". Ans 1999+2000. | | | |
|--|------------------|-----------------|-------|
| | V ↓ _≅ | autres réponses | Total |
| Groupe experimental | 79 | 162 | 241 |
| Groupe de contrôle | 19 | 149 | 168 |
| Total | 98 | 311 | 409 |

Khi deux = 25,0
Niveau $p < 0,01\%$

Ici les valeurs du khi-deux sont encore plus élevées, les différences sont très nettement significatives.

Ces résultats peuvent bien être considérés comme un effet de la séquence, qui prend en compte les déformations et l'état interne du liquide.

La lecture des justifications montre aussi une forte différenciation dans les arguments utilisés par les étudiants des deux groupes.

On peut classer les raisonnements utilisés en deux catégories, que j'appellerai "interne" et "externe".

Dans le premier type de raisonnement ("interne"), l'étudiant raisonne sur la base des changements dans l'état interne du liquide, souvent en termes de molécules ou de particules de liquide, de déformations locales qui se transmettent dans le liquide. Dans ces cas, l'étudiant essaie de se former aussi une image de ce qui se passe dans le liquide.

Dans le second ("externe"), l'étudiant utilise des formules, comme $pV=nRT$, $pV=k$, $p=F/S$, $m=\rho V$, ou des affirmations ou règles générales, comme "les liquides sont incompressibles", "si p augmente, alors V diminue", ou l'inverse. Lorsqu'il propose un raisonnement plus argumenté, il s'agit d'un raisonnement global, concernant l'eau de la seringue comme un tout, par exemple "il faut mettre une même quantité d'eau dans un volume plus petit".

Dans le groupe de contrôle, les raisonnements "internes" sont très rares, se manifestant chez environ 9% du total des étudiants du groupe, tandis qu'ils sont beaucoup plus fréquents dans le groupe expérimental, environ 20%. Les justifications du groupe expérimental sont beaucoup plus riches de descriptions. En plus, dans le groupe expérimental, plusieurs étudiants (21) font plus ou moins explicitement référence au modèle de la séquence, parfois aussi avec des dessins.

Quelques exemples de justifications d'étudiants du groupe expérimental :

"... les molécules d'eau, que l'on peut comparer à des petites billes, sont serrées les unes contre les autres et exercent une force plus grande les unes contre les autres ..." 00SL20

"La pression augmente, car on applique une force plus grande qui va se répercuter de molécule en molécule. ... Le volume diminue un peu, car les molécules d'eau sont un peu compressibles." 00SL76. Ici, et aussi pour d'autres étudiants, le mot "molécule" semble faire penser plutôt à un élément mésoscopique de fluide qu'à une particule microscopique.

"Le volume diminue, les gouttes d'eau sont écrasées les unes sur les autres, jusqu'à un certain point." 00EN02

"Comme l'eau est compressible, les particules d'eau se déformant exercent une force sur les parois latérales, qui sera compensée par une force de réaction des parois, qui va augmenter." L'étudiant fait un dessin avec des billes rondes dans une seringue, à côté d'une autre avec des billes déformées en ovale dans la seringue. 00EN69

"La pression de l'eau augmente, car l'eau est un peu compressible et comme si des balles en mousse étaient comprimées, elles poussent plus fort vers l'extérieur, donc la pression dans l'eau est plus grande." 00EN25

"... La pression augmente partout, comme si on prenait des billes, les forces qu'elles exercent les unes sur les autres augmentent." 99S01

"... Si on pousse, on réduit l'espace, on augmente la densité ... et donc la pression augmente. Car la pression s'exerce comme suit (dessin avec des petites boules dans une seringue et trois boules avec des flèches), c'est-à-dire de proche en proche ..." 99S52.

Il faut dire que l'évocation du modèle de la séquence n'est parfois pas suffisante pour arriver à une réponse complète et correcte, comme le montrent les citations suivantes, dans lesquelles l'idée reçue que "les liquides sont incompressibles" prime sur les suggestions véhiculées par la séquence:

"Le volume reste inchangé, car l'eau est un liquide incompressible. C'est-à-dire que l'on peut comparer un récipient d'eau à un récipient rempli de petites billes que l'on ne sait pas compresser." 00SL36

"La pression augmente dans la seringue, mais le volume reste inchangé, étant donné que l'eau est incompressible. Cette eau transmet intégralement la pression dans toutes les directions, étant donné que chaque molécule se comporte un peu comme une bille, qui pousse sur ses voisines, si elle-même est poussée (par le piston, par exemple)." 00EN12

7.5.3 Quelques conclusions

Le groupe expérimental prend davantage en considération les diminutions de volume du liquide dues à la force exercée sur le piston. Surtout, il envisage beaucoup plus de très petites diminutions de volume, que le groupe de contrôle, au contraire, prend en compte très rarement.

La différence entre les deux groupes sur cet aspect est assez forte ; le test du khi-deux donne toujours des différences significatives, souvent nettement significatives.

Les raisonnements utilisés par les étudiants du groupe expérimental sont plus articulés et riches en références aux modifications internes du liquide et aux modèles particuliers.

Ces résultats peuvent être considérés comme un effet de la séquence, qui prend en compte les déformations et l'état interne du liquide.

7.6 Post-test : Questionnaire "Casserole"

Dans une casserole il y a de l'eau.

Question 1 : Les molécules de l'eau choquent-elles les parois de la casserole ?

| | oui | | non | | NR | Total |
|---------------------|-----|-----|-----|-----|----|-------|
| Groupe expérimental | 55 | 83% | 11 | 17% | 2 | 68 |
| Groupe de contrôle | 58 | 88% | 8 | 12% | 8 | 74 |
| Total | 113 | 86% | 19 | 14% | 10 | 142 |

Comparaison entre les deux groupes, en ce qui concerne les réponses oui/non à la question 1 :

| | oui | | non | | Total |
|---------------------|-----|-----|-----|-----|-------|
| Groupe expérimental | 55 | 83% | 11 | 17% | 66 |
| Groupe de contrôle | 58 | 88% | 8 | 12% | 66 |
| Total | 113 | 86% | 19 | 14% | 132 |

On trouve $\chi^2=0,55$, soit une différence nettement non significative, même au niveau 50%

Question 2 : Si l'on chauffe l'eau, la pression de l'eau change-t-elle ? Si oui, augmente-t-elle ou diminue-t-elle ?

Groupe expérimental : 60 réponses

| Utilisation du modèle moléculaire cinétique dans les justifications | P = | | P ↑ | | P ↓ | | ? | Total | |
|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|---|-------|-----|
| oui | 3 | 5% | 13 | 22% | 10 | 17% | 2 | 28 | 47% |
| non | 6 | 10% | 10 | 17% | 8 | 13% | 0 | 24 | 40% |
| Réponses sans explications | 5 | 8% | 1 | 1% | 2 | 3% | 0 | 8 | 13% |
| | 14 | 23% | 24 | 40% | 20 | 33% | 2 | 60 | |

Groupe de contrôle : 61 réponses

| Utilisation du modèle moléculaire cinétique dans les justifications | P = | | P ↑ | | P ↓ | | ? | Total | |
|---|-----|------|-----|-----|-----|------|---|-------|-----|
| oui | 1 | 1,6% | 13 | 21% | 4 | 6,6% | 1 | 19 | 31% |
| non | 4 | 6,6% | 15 | 25% | 11 | 18% | 1 | 31 | 51% |
| Réponses sans explications | 4 | 6,6% | 6 | 10% | 0 | | 1 | 11 | 18% |
| | 9 | 15% | 34 | 56% | 15 | 25% | 3 | 61 | |

Comparaison entre les deux groupes, selon qu'ils ont donné ou non des justifications en termes de cinétique moléculaire, en utilisant les molécules de l'eau, pour la question 1 :

| | Utilisation du modèle moléculaire cinétique dans les justifications | | | | Total |
|---------------------|---|-----|-----|-----|-------|
| | oui | | non | | |
| Groupe expérimental | 28 | 54% | 24 | 46% | 52 |
| Groupe contrôle | 19 | 38% | 31 | 62% | 50 |
| Total | 47 | 46% | 55 | 54% | 102 |

Les explications en termes de cinétique moléculaire sont plus nombreuses dans le groupe expérimental, mais la différence n'est pas significative ($\chi^2=2,5$, niveau 15%).

Ces résultats montrent que, au moins dans cette situation, l'introduction de la séquence avec le modèle mésoscopique des balles de mousse n'a pas provoqué un oubli ou un blocage de l'utilisation du modèle microscopique, moléculaire et cinétique, de la matière.

7.7 Réactions et évaluations des enseignants sur une éventuelle utilisation de la séquence

Comme il est toujours plus fréquemment suggéré dans la littérature didactique, et comme nous en avons désormais d'habitude dans notre groupe de travail, nous avons voulu vérifier les réactions et les évaluations des enseignants sur une éventuelle utilisation de la séquence.

Dans ce but, la séquence a été proposée à deux groupes d'enseignants de collège et de lycée en formation à l'IUFM de Lille, par une professeur non associée à notre recherche (Françoise Chauvet, maître de conférences à l'IUFM Nord-Pas de Calais).

7.7.1 La présentation de la séquence à deux groupes d'enseignants

Le premier groupe, constitué de 22 enseignants-stagiaires en première formation, a reçu la séquence en 1999, à peu près comme elle est décrite et expérimentée pour les étudiants, avec les pre-tests et les post-tests. Les enseignants-stagiaires ont été prévenus qu'il s'agissait de tester une séquence expérimentale, sur laquelle on leur demandait de réfléchir et de débattre, après l'avoir eux-mêmes suivie, en tant qu'apprenants. Dans ce cas, le but était surtout d'utiliser les réactions et les observations des enseignants pour mieux calibrer l'intervention chez les étudiants. Certains éléments des résultats des tests ont été discutés dans le chapitre 5, concernant l'étude des raisonnements, et montrent la persistance de certaines conceptions même chez ces enseignants, par exemple la déconnexion entre la poussée d'Archimède et les forces de pression, l'idée de l'incompressibilité des liquides, l'identification entre forces de pression et forces gravitationnelles. Nous ne disposons pas de documents sur les observations et les débats de ces enseignants-stagiaires, tous oraux et non enregistrés.

Le deuxième groupe, constitué de 20 enseignants en formation, ayant la responsabilité d'une classe en lycée ou (pour la plupart) en collège, a reçu la séquence en 2001, telle qu'elle a été expérimentée avec les étudiants.

Une première demi-journée a été consacrée à un enseignement de mécanique, où étaient analysés, à l'aide de « schémas éclatés », quelques situations impliquant des interactions de contact et la gravité terrestre (une valise accélérée vers le haut par un voyageur, une masse oscillante au bout d'un ressort vertical, une boule trempée dans un verre d'eau lui-même sur une balance). L'après-midi a été dédié au thème des fluides, par rapport au programme de seconde en cours, avec une évocation des deux niveaux de description, macroscopique et microscopique, évoqués dans le programme. Le niveau mésoscopique a été introduit dans ce cadre, via notre séquence didactique, avec le modèle des balles de mousse.

La présentation de la séquence commence par la proposition des situations des questionnaires "Poissons" et "Chambre", avec une analyse et un débat sur les réponses et les difficultés possibles. Pour préserver un climat psychologique favorable, les situations utilisées au début pour sensibiliser l'auditoire aux difficultés du domaine n'ont pas donné lieu à ramassage de réponses. Ensuite, la séquence elle-même a été développée, occupant une heure et demie, et s'est conclue sur le questionnaire "Récipients".

En fin de séance, une consultation sur la proposition didactique présentée a été faite, moyennant le questionnaire "Séquence des balles de mousse" dont nous donnons le texte ci-dessous.

Questionnaire "Séquence des balles de mousse"

- 1) Aimeriez-vous utiliser cette séquence ? Pour quels élèves ?
- 2) Quels sont, selon vous, les points positifs ?
- 3) Et les points négatifs ?
- 4) Où prévoyez-vous des difficultés pour les élèves ?
- 5) Et des difficultés pour les enseignants ?
- 6) Que souhaiteriez-vous modifier et pourquoi ?
- 7) Comment verriez-vous la suite de cet enseignement ?

7.7.2 Analyse des réponses des enseignants au questionnaire

Le questionnement s'est concentré sur les avis des enseignants concernant une éventuelle utilisation de la séquence et les aspects considérés positifs ou négatifs.

Malgré l'absence de collecte formelle d'informations sur le parcours conceptuel des enseignants durant l'expérience didactique proposée, la séance du matin ainsi que les situations des questionnaires "Poissons" et "Chambre" avaient suscité des discussions animées, ce qui montre que les éléments introduits dans cette formation n'étaient pas triviaux pour les enseignants.

Question 1

Sur la première question, « aimeriez-vous utiliser cette séquence et si oui pour quels élèves ? », les enseignants se répartissent presque par tiers (respectivement 6, 6 et 8) sur les trois positions suivantes : oui (pour le lycée, surtout en 1^{ère} ou en terminale), peut-être (selon les types d'élèves, avec des modifications), non.

Question 2

Les points positifs se concentrent sur les aspects suivants.

- Caractère « concret », « visuel », simple du modèle (9/20 enseignants). Par exemple:
 - « Le modèle permet une perception concrète du phénomène, de comprendre ce qui se passe réellement », LE03.
 - « Faire visualiser ce qui se passe », LE15.
 - « C'est plus abordable, car plus visuel (concret) → facilité de compréhension », LE20.
 - « Permet de modéliser sans trop simplifier. Permet d'éviter d'utiliser des lois à appliquer, mais de réellement comprendre », LE19.
 - « Simplifier la modélisation que se font les élèves, faciliter la compréhension », LE07.
- Mise en œuvre des bases de la mécanique, aide à la compréhension de la mécanique, surtout « la loi de l'action et de la réaction », analogie mécanique – hydrostatique, (6/20). Par exemple:
 - « Aide les élèves à se familiariser avec la mécanique », LE14.
 - « Révision sur la mécanique. Amener une situation problème », LE16.
 - « L'analogie mécanique – hydrostatique, intéressante ! », LE12.

« Approche mécanique » LE10.

- Permet de mieux comprendre les difficultés des élèves (2/20).

« Nous fait prendre conscience de la difficulté de l'introduction de ces notions, voir adapter son enseignement, en utilisant des explications dans cet esprit » LE18.

« Les points positifs sont pour nous. Ça nous a fait comprendre les difficultés des élèves à comprendre certaines notions » LE04.

Question 3

En ce qui concerne les points négatifs, il y a eu 18 réponses.

La plupart des enseignants (12/20) évoquent la difficulté de la séquence. Cette difficulté est censée résider surtout (pour 10 enseignants) dans la nécessité de maîtriser certaines notions de mécanique, comme préliminaires pour une bonne compréhension de la séquence. En particulier, la troisième loi de Newton est mentionnée par 5 enseignants, comme source de difficulté pour les élèves, particulièrement aux niveaux scolaires plus bas. Il faut dire que, probablement, ces réponses sont influencées par le fait que la majorité du groupe enseignait en collège.

La longueur de la séquence, le temps qu'elle requiert, sont évoqués par 7 enseignants.

D'autres réponses éparées indiquent, par exemple, la difficulté à imaginer le système (LE13, LE15), le fait que les analogies sont souvent retenues comme réelles par les élèves (LE15), et le risque de confusion lorsqu'on retourne au formalisme classique des cours de sciences (LE15).

Il est intéressant de remarquer que parfois, un même point sert de base à l'argumentation d'enseignants dont les réponses diffèrent en ce qui concerne l'éventuelle utilisation en classe de la séquence (oui, peut-être, non). Il arrive aussi que le même argument apparaisse, chez un même individu, comme un aspect positif et aussi dans la rubrique des inconvénients.

Ainsi, par exemple, à l'appui d'une réponse « Oui (pour élèves de lycée) » à la question sur l'utilisation de la séquence, un même enseignant indique les aspects positifs et négatifs suivants :

- Point positif: « Notion Action-Réaction à maîtriser et connaître » ;
- Point négatif: « Notion Action-Réaction à maîtriser. »

Un autre enseignant, à l'appui d'une réponse « Non » :

- Point positif: « Les points positifs sont pour nous. Ça nous a fait comprendre les difficultés des élèves à comprendre certaines notions. »
- Point négatif: « Étant professeur au collège, c'était difficile de se mettre dans le bain de la mécanique. »

Encore à l'appui d'une réponse « Non », un autre enseignant :

- Point négatif: « Demande maîtrise d'une matière (maîtrise de la mécanique), pour l'apprentissage d'une nouvelle notion → échec immédiat pour des élèves déjà en difficulté ! »
- Point positif: « point positif = point négatif précédent car si on arrive à réinvestir des notions de mécanique, c'est super! (cf. les points négatifs) ».

À l'appui d'une réponse "*Peut-être*", un enseignant évoque les points positifs et négatifs suivants:

- Point négatif: "*Action-réaction: notion peu abordée, donc difficile d'utiliser cette méthode, ou alors il faudrait introduire action-réaction de manière très rigoureuse*".
- Point positif: "*Nous fait prendre conscience de la difficulté de l'introduction de cette notion, voire adapter son enseignement en utilisant des explications dans cet esprit*".

Question 4

Nous avons 17 réponses à cette question sur les difficultés des élèves.

Encore une fois, ce sont les difficultés liées à la maîtrise des notions de mécanique qui préoccupent le plus les enseignants (9), dont 6 mentionnent encore la troisième loi de Newton et 4 la difficulté à comprendre l'analyse des forces agissant sur une balle ou le caractère vectoriel des forces.

D'autres difficultés possibles sont évoquées: le risque de confusion entre pression et force (3 enseignants), le niveau d'abstraction requis (2), la confusion possible entre modèle et réalité, l'absence d'outils pratiques, qui pourrait démotiver les élèves, la compressibilité du liquide (2), la représentation de balles de mousse collées, qui serait contraire à l'image usuelle des gaz et ressemble plutôt à l'image des solides.

Question 5

Nous avons 17 réponses à cette question qui porte sur les difficultés des enseignants.

Les réponses sont très dispersées. Pour 4 enseignants, il peut être difficile de maîtriser la séquence même et de savoir l'expliquer ; pour deux enseignants, il peut y avoir un risque de confusion, car il y aurait trop de notions en jeu, deux autres trouvent difficile de l'adapter aux élèves. Trois enseignants mentionnent la difficulté de gestion de la classe, parce que la séquence leur semble plutôt longue et qu'ils craignent un manque d'attention et une démobilisation de la classe. Deux enseignants évoquent encore une fois la difficulté de devoir reprendre la mécanique et surtout la troisième loi de Newton. L'absence d'expérience pratique et l'abstraction requise sont citées par deux enseignants. Autres obstacles évoqués : la difficulté de bien établir le lien entre les balles de mousse et le liquide (2), l'effort demandé pour s'adapter à l'approche proposée, en changeant ses propres habitudes, la difficulté d'expliquer la compressibilité et l'expansion des fluides avec un modèle comportant des balles collées entre elles.

Questions 6 et 7

En ce qui concerne les modifications proposées et la suite éventuelle, nous avons peu de réponses à ces deux questions. 11 et 10 enseignants respectivement ne répondent pas aux questions 6 et 7 ; 7 d'entre eux ne répondent à aucune des deux.

Au total, six enseignants proposent d'introduire des activités pratiques, durant ou après la séquence, et deux des logiciels de simulation à l'ordinateur.

Autres modifications proposées : faire bien comprendre qu'il s'agit d'un modèle, avec ses limites d'application, changer le point de départ, considéré comme trop difficile pour un démarrage (en effet, le début présenté à ce groupe d'enseignants n'était pas le même prévu et utilisé dans l'expérimentation chez les étudiants).

Autres suggestions pour une suite : traiter les thèmes du programme ayant un rapport avec la séquence (notions de mécanique, "l'air qui nous entoure", l'hydrostatique) ; analyser les réactions des élèves, et "*s'inspirer des questionnaires pour soulever les problèmes rencontrés*".

par les élèves et orienter ainsi le cours en fonction des lacunes" (LE16).

7.7.3 Quelques conclusions

Les discussions animées suscitées lors des séances montrent que les éléments introduits dans cette formation n'étaient pas triviaux pour les enseignants.

Sur l'intention éventuelle d'utiliser la séquence en classe, les enseignants se répartissent presque par tiers (respectivement 6, 6 et 8) sur les trois positions suivantes : oui (pour le lycée, surtout en 1^{ère} ou en terminale), peut-être (selon les types d'élèves, avec des modifications), et non.

Les principaux points positifs indiqués sont : le caractère « concret », « visuel », simple, du modèle (9/20 enseignants) ; la mise en œuvre de notions de mécanique (6/20), dont surtout la troisième loi de Newton (5/20), pouvant aider à la compréhension de ces sujets, considérés en général difficiles par les élèves ; l'intérêt de l'analogie entre mécanique et hydrostatique (1/20) ; la sollicitation d'une réflexion de la part des enseignants eux-mêmes, qui leur a permis de mieux comprendre les difficultés des élèves (2/20).

Le principal point négatif indiqué a été la difficulté de la séquence (12/20), liée surtout (pour 10 enseignants) à la nécessité de maîtriser certaines notions de mécanique, pour bien comprendre la séquence, en particulier la troisième loi de Newton (5 enseignants), particulièrement pour les niveaux scolaires plus bas. La longueur de la séquence et le temps qu'elle requiert sont évoqués par 7 enseignants.

On voit que l'utilisation de notions de mécanique peut être considérée comme un élément positif ou négatif, selon les cas. Parfois, un même professeur évoque la présence de la mécanique dans les deux catégories, points positifs et obstacles (5/20). Il semble que plusieurs enseignants craignent que la nécessité d'une certaine maîtrise des notions de mécanique, demandée par la séquence, puisse constituer un obstacle insurmontable pour les élèves, mais, en même temps, ils pensent que, s'il était possible de surmonter cet obstacle et de favoriser ainsi un réinvestissement et une meilleure compréhension de ces aspects de la mécanique, cela serait sans aucun doute un résultat très positif, *"car si on arrive à réinvestir des notions de mécanique, c'est super !"*

Quelques enseignants trouvent difficile de bien maîtriser la séquence et de savoir l'expliquer (4), ou savoir l'adapter aux élèves (2).

La modification principale proposée par les enseignants concerne l'introduction, durant ou après la séquence, d'activités pratiques (6) ou de logiciels de simulation à l'ordinateur (2).

Si les objections des enseignants sont très souvent posées en termes de difficultés liées aux connaissances de mécanique requises, on voit toutefois que, quand il s'agit de concilier la compréhension d'aspects locaux et globaux d'un système fluide à l'équilibre en présence de gravité, aucun enseignant consulté ne va jusqu'à suggérer comment le passage par la mécanique peut être évité. Certaines réponses suggèrent que cette difficulté a été ressentie par quelques professeurs, ce que l'un d'entre eux exprime très simplement : *"Étant professeur au collège, c'était difficile de se mettre dans le bain de la mécanique"*. On peut supposer que, lorsqu'un professeur expérimenté éprouve lui-même la nécessité d'un effort pour comprendre, il risque de penser que cela serait nécessairement un obstacle insurmontable pour des élèves.

Plusieurs observations des enseignants confirment qu'une adaptation de la séquence est nécessaire, selon le niveau scolaire du public concerné. En particulier, pour des élèves de lycée, surtout en seconde, il faut envisager un contrôle préalable et un renforcement de certaines connaissances de mécanique, ainsi qu'une fragmentation de l'intervention didactique en plusieurs séances plus courtes.

L'introduction de quelques activités pratiques peut bien être envisagée, mais il faut dire que, s'il est probable que ces activités puissent favoriser la motivation et l'intérêt des élèves, notre analyse semble bien montrer que des observations pratiques ou des mesures de pression ne sont pas suffisantes, ni essentielles, pour résoudre les difficultés ciblées, qui se situent plutôt au niveau des raisonnements impliqués. C'est à ce niveau et dans ce registre qu'on peut essayer de surmonter ces difficultés. En effet, on observe des blocages chez des élèves qui connaissent fort bien la relation classique $\Delta p = -\rho g \Delta h$, mais n'arrivent pas à intégrer celle-ci dans une analyse d'ensemble de la situation. Il s'agit donc plutôt, à notre avis, de mettre en œuvre une construction conceptuelle progressive, en s'appuyant sur l'analyse des forces en jeu et de graphiques, ainsi que sur les débats des étudiants entre eux ou avec l'enseignant.

7.8 Conclusions

L'analyse statistique des résultats du pre-test confirme l'équivalence du point de départ du groupe expérimental et du groupe de contrôle.

L'analyse, faite moyennant le test du khi-deux, montre qu'on avait au départ deux populations statistiquement équivalentes au pre-test et qu'on les trouve, après la séquence, statistiquement différenciées sur certains aspects des post-tests passés.

Résumons ces aspects de différenciation.

À la question 1 du questionnaire "Poissons", les étudiants du groupe expérimental donnent un pourcentage plus élevé de réponses correctes : 79% contre 69% du groupe de contrôle. Le test du khi deux indique que cette différence est *significative au niveau 1,4%*. Il s'agit donc d'un premier résultat, qui n'est certes pas éclatant, mais qui marque un effet positif, statistiquement contrôlé, à un niveau de confiance élevé.

On retrouve une différence en faveur du groupe expérimental aussi sur la question concernant l'existence de forces exercées par le rocher sur l'eau en haut de la grotte : 81% contre 67%. Le test du khi deux indique que cette différence est *significative au niveau 1%* (seuil au 0,2%). Même s'il ne concerne qu'une minorité d'étudiants, il s'agit d'un résultat positif, qui peut être considéré comme un effet de la séquence sur cet aspect très particulier. Cet effet était attendu, compte tenu de l'insistance avec laquelle on décrit, dans la séquence, les forces exercées mutuellement par les balles de mousse et leurs interactions avec la paroi ou avec la main. Cet aspect fait partie de l'un des objectifs principaux déclarés de l'intervention didactique élaborée, c'est-à-dire promouvoir une image du liquide fondée sur la présence d'actions réciproques entre les éléments mésoscopiques et avec les parois, qui se transmettent de proche en proche, en propageant ainsi les modifications locales, dans une vision systémique de la situation physique en étude.

Une avancée dans la direction de ce même objectif se trouve confirmée positivement par l'analyse des résultats du questionnaire "Seringue". Les réponses à ce questionnaire montrent que le groupe expérimental prend beaucoup plus en considération les variations de volume du liquide, dues à la force exercée sur le piston. Surtout, il envisage beaucoup plus de très petites diminutions de volume, alors que le groupe de contrôle, au contraire, les prend en compte très rarement. La différence entre les deux groupes sur cet aspect est assez forte ; le test du khi-deux donne toujours des différences, souvent nettement significatives. Les justifications montrent que les raisonnements utilisés par les étudiants du groupe expérimental sont plus articulés et riches de références aux modifications internes du liquide et aux modèles

particulaires. Ces résultats peuvent être considérés comme un effet de la séquence, qui prend en compte les déformations et l'état interne du liquide, en modélisant les liquides avec des balles de mousses raides, et néanmoins déformables, quoique très peu.

Les réponses à la question 1 du questionnaire "Ballon dans l'eau" montrent clairement que le groupe expérimental a acquis une meilleure compréhension des caractéristiques des forces de pression dans un liquide. La différence entre les deux groupes est, dans ce cas, très forte : 58% contre 33% de réponses correctes (ou 64% contre 45% de réponses correctes ou presque correctes) en 2000, 55% contre 35% (ou 63% contre 46%) pour les deux ans cumulés. Le test du khi-deux indique que cette différence est significative à un niveau $p < 0,1\%$ dans les deux cas. Il s'agit, sans aucun doute, du résultat quantitatif le plus évident parmi ceux qui indiquent une amélioration du groupe expérimental.

Sur la base de ces données, on peut conclure que la séquence a agi de façon très efficace sur les aspects concernant l'existence et les caractéristiques des forces de pression dans un liquide.

Au contraire, les réponses à la question 2 du même questionnaire, concernant la poussée d'Archimède, montrent qu'il n'y a pas de différence significative entre les résultats des deux groupes, même si on trouve encore un petit avantage en faveur du groupe expérimental.

Il semble donc que la séquence n'a pas eu d'effets importants sur une meilleure compréhension de la nature de la poussée d'Archimède.

Ce résultat confirme la difficulté des étudiants sur cet aspect, déjà mise en évidence au chapitre 5, et montre aussi qu'une bonne compréhension des caractéristiques des forces de pression agissant sur un objet immergé dans un liquide, comme celle qui s'est manifestée dans le groupe expérimental de l'an 2000, ne conduit pas spontanément à une mise en relation efficace entre ces forces et la poussée d'Archimède.

En effet, la grande majorité des étudiants continue à considérer la poussée d'Archimède comme étant une force distincte de celles de pression, de nature et d'origine différentes. Souvent cette distinction est évoquée explicitement. Plusieurs étudiants soulignent la nature "globale" de la poussée d'Archimède, considérée comme une force de volume, agissant sur tout le ballon, appliquée au centre du ballon et dirigée vers le haut, en contraste avec les forces de pression, qui sont des forces de contact, "locales", agissant sur chaque petite partie du ballon et dirigées aussi vers le bas : contraste si radical que la connexion entre les deux phénomènes devient difficile à saisir.

Dans l'expérimentation de notre intervention didactique, l'une de nos préoccupations était de ne pas engendrer d'éventuels effets négatifs. Notre souci était que ce modèle statique et mésoscopique des balles de mousse aurait pu provoquer un oubli ou un obstacle à l'utilisation des modèles moléculaires microscopiques. La vérification de cet éventuel effet collatéral négatif s'est effectuée au moyen du questionnaire "Casserole".

L'analyse statistique montre qu'il n'y a pas de différence significative entre les deux groupes dans les réponses à ce questionnaire.

Les justifications données avec les réponses à la question 2 montrent que le groupe expérimental utilise des explications en termes du modèle microscopique, moléculaire et cinétique, du liquide un peu plus que le groupe de contrôle ; mais le test du khi deux indique que cette différence n'est pas significative (le niveau seuil est à 15%). Ce résultat montre qu'il n'y a pas eu non plus les effets négatifs que l'on se devait d'envisager : l'introduction de la séquence avec le modèle mésoscopique des balles de mousse n'a pas provoqué un oubli ou un blocage de l'utilisation du modèle moléculaire cinétique de la matière.

Quelques éléments tirés des justifications données par les étudiants avec les réponses au questionnaire "Poissons" indiquent une influence claire de la séquence. Il faut dire que, comme il arrive souvent, une bonne partie des étudiants ne donne pas des justifications bien argumentées et donc intéressantes ; on obtient souvent des petites phrases très courtes et sèches, qui ne fournissent pas d'indications claires sur le raisonnement impliqué dans la réponse. Parfois, mais plus rarement, il n'y a pas du tout de justification. C'est pourquoi les pourcentages indiqués dans la suite sont toujours petits, car ils sont calculés sur le total de la population, réponses sans justifications classables incluses. Il nous reste, en tout cas, un échantillon suffisant de justifications claires.

Parmi ceux qui ont donné la réponse correcte, plusieurs étudiants (25, soit 11%) du groupe expérimental font appel au modèle des balles de mousse et plusieurs (24, soit 10% contre 3, soit 2% dans le groupe contrôle) font un raisonnement en termes d'actions horizontales, parfois moyennant le modèle proposé.

29 étudiants (soit 13%) du groupe expérimental évoquent la force exercée par le plafond de la grotte sur l'eau pour justifier que la pression est égale pour les deux poissons, même s'ils ont des hauteurs différentes d'eau au-dessus d'eux.

Ces justifications suggèrent qu'une avancée notable s'est produite, sur la base du modèle, chez certains étudiants.

En ce qui concerne les effets constatés de la séquence sur les résultats bruts des questionnaires, il faut préciser qu'on ne pouvait pas s'attendre à un raz-de-marée d'améliorations et de succès, au moins pour deux raisons.

Avant tout, l'intervention didactique est très courte et elle ne différencie les deux groupes en comparaison que pour deux heures et demie d'activités, sur un segment très limité du cours de physique qu'ils suivent.

En outre, les modifications cibles de la séquence sont vérifiées, dans une bonne partie du post-test, sur des questions auxquelles, en général, les populations témoins de ce niveau donnent des réponses majoritairement correctes. Au questionnaire "Poissons", les réponses non correctes du groupe de contrôle représentent en moyenne un tiers du total pour la question 1 ; elles sont encore plus rares (entre 15% et 25%) pour les questions 2 et 3. Il s'agit donc d'essayer d'agir sur *une minorité qui se trompe* et donc les améliorations, en termes de pourcentages absolus, ne peuvent être que petites.




Dans ce cadre, il est bien important, pour une évaluation attentive et approfondie, de prendre en considération non seulement les données brutes des réponses aux questionnaires, mais aussi tous les éléments disponibles qui susceptibles d'indiquer des effets sur les raisonnements activés, sur la façon de voir la situation physique en question et d'organiser des discours sur cette situation. Les quelques indications tirées des justifications données avec les réponses aux questionnaires ont été utiles à cet égard, mais, comme nous l'avons déjà fait remarquer, les justifications disponibles sont souvent assez courtes et peu détaillées.

À ce propos, l'analyse des débats enregistrés entre étudiants, présentés dans le chapitre suivant, est très utile pour recueillir d'autres indications, plus approfondies et étendues, concernant les effets de la séquence sur les raisonnements des étudiants.

CHAPITRE 8. LES DEBATS DES ETUDIANTS

8.1 Recueil des données

Afin d'évaluer la pertinence et l'effet de la séquence didactique proposée, les évaluations externes, c'est à dire par comparaison entre groupes expérimentaux et groupes de contrôle, nous semblent devoir être complétées par des observations du déroulement en classe. Il s'agit de tenter une évaluation de la manière dont interviennent les éléments didactiques supposés bénéfiques dans la confrontation des étudiants aux difficultés du domaine. Nous voulons voir si les outils de raisonnement mis en place fonctionnent effectivement et comment.

Nous disposons d'enregistrements effectués en travaux dirigés, une semaine après celle où a été introduit – en deux heures - l'enseignement proposé, c'est à dire le modèle des boules et son application à la pression dans un fluide. La séance observée commence par un problème à résoudre en binômes de deux étudiants. L'exercice proposé est celui intitulé « Récipients » (voir 7.2.1) : trois récipients de formes différentes a) , b) , c)  sont remplis d'eau jusqu'au même niveau ; il s'agit de comparer les forces exercées par l'eau sur le fond (de même aire) des trois récipients. Les étudiants sont d'emblée incités à se servir du modèle des boules vu la semaine précédente.

Un binôme volontaire par séance a été enregistré, la discussion durant de l'ordre de 15-20 minutes. Lors de cette séance, le professeur circulait d'un binôme à l'autre. Des feuilles de réponses avec des dessins ont pu être recueillies.

Nous disposons ainsi de 9 enregistrements et de 14 feuilles de réponses, dont 7 accompagnent un enregistrement. Les transcriptions des enregistrements et les copies des feuilles de réponses sont en annexes. Les répliques, c'est à dire l'ensemble des phrases prononcées par une personne donnée sans interruption par une autre, sont toutes numérotées dans l'ordre avec un label indiquant celui des deux (trois dans un des débats) étudiants qui parle (A ou B ou C), à moins que ce ne soit le professeur (P).

Ce corpus de données est exploité essentiellement par une analyse naturelle des répliques. Il est certain que l'absence d'enregistrement visuel gêne la compréhension de ce que font les élèves, mais en fait, la plupart du temps, il est assez facile de reconstituer ce qui se passe, surtout dans les cas où une feuille de réponse est fournie.

Quelques éléments verbaux sont repérés de manière simple, c'est à dire que l'on n'a pas décompté les répétitions à l'intérieur d'une même phrase, ni les rappels de toutes sortes (par exemple « celle-là », « l'autre », etc..). C'est donc une indication de première occurrence dans une phrase et de fréquence globale minimale que l'on repère.

8.2 Grille d'analyse des enregistrements

Etant donné les hypothèses fondatrices de cette proposition, et à la lumière d'une première lecture des enregistrements, les points sur lesquels se centre l'analyse sont les suivants. On notera que certains de ces aspects se recouvrent partiellement.

- ENGAG** - Engagement des élèves dans le débat, désir d'aboutir.
- DIFF** - Existence des difficultés prévues, sous l'une ou l'autre des formes suivantes.
- La force est plus grande pour le récipient a / $__\backslash$, car dans un espace plus étroit la pression est plus grande, parce que le liquide y est "compressé".
 - Du fait de parois obliques, il y a plus d'eau dans un récipient ($a \backslash _ /$), moins dans l'autre ($c / __\backslash$), par rapport à celui à parois verticales $b \boxed{}$ (raisonnement "plus d'eau=plus de force sur le fond").
 - Les « colonnes d'eau » impliquées n'ont pas toutes la même hauteur, également du fait de parois obliques.
- NIV p=** - Allusion à la contrainte "à un même niveau d'eau, la pression est la même", sous l'une des deux formes suivantes :
- Référence à la règle ou à la formule apprises, du type "la pression dépend de la profondeur".
 - Référence à la séquence, où l'on analyse les forces sur une ligne horizontale.
- DISCO** - Utilisation d'éléments discrets (« boules », « billes »...) comme dans le modèle proposé. Il est important de voir si les boules sont considérées *jointives* ou sans contact, et si des forces ou des actions entre les boules sont prises en compte.
- FORCE** - Le mot « force » ou d'autres expressions qui renvoient à la même idée, telles que « ça pousse », « ça s'applique » etc., dont la signification semble très peu différenciée de celle de « pression » (les étudiants utilisent souvent le mot "pression" dans le sens de "force pressante"). La présence de ces expressions peut être, malgré toutes les éventuelles ambiguïtés, un marqueur d'une analyse relativement proche de celle du modèle proposé.
- COMPR** - Référence à la compressibilité et déformabilité des boules ou de l'eau.
- SEQUEN** - Allusion à des exemples et situations caractérisant la séance précédente : l'action de la paroi « comme une main », boules qui poussent sur le plafond ou sur le mur, égalité des forces sur une ligne horizontale, piston et récipient.
- PAROI** - Considération du rôle des parois, pouvant être envisagé par les étudiants en deux façons différentes, que j'indiquerai en abrégé "Support" et "Interaction" :
- Comme "support", lorsque l'étudiant exprime l'idée que la paroi oblique empêche le poids de l'eau au-dessus d'agir sur le fond.
 - Comme "interaction", lorsque les étudiants mentionnent des forces exercées par les parois sur l'eau ; c'est là un élément crucial dans la résolution des conflits engendrés par les difficultés évoquées ci-dessus.
- DECOM** - Caractère vectoriel des forces et leur décomposition selon les directions horizontale et verticale. Pression « horizontale », « verticale », « oblique », "force perpendiculaire à la paroi", "composantes de la force", sont des expressions repérées comme éventuels indicateurs d'une analyse plus fine en terme de forces.

- DENOU** - Existence d'un « dénouement » du conflit, c'est à dire d'un accord manifeste d'au moins l'un des interlocuteurs en faveur de la solution correcte (les trois forces sont les mêmes) accompagnée de l'explication du rôle des parois obliques (au moins ceci : la composante verticale de la force qu'elles exercent sur l'eau rend compte du paradoxe apparent lié aux colonnes d'eau de hauteurs inégales).
- DESSIN** - Lorsqu'une feuille avec dessin est disponible, ses principaux caractères sont signalés. On repère en particulier la présence de dessins avec des boules jointives et l'indication de forces, moyennant des flèches.

8.3 Résultats de l'analyse des débats

Les analyses de chaque débat sont présentées dans la section 8.5, à la fin de ce chapitre, nous donnons ici une synthèse des résultats obtenus.

8.3.1 Engagement dans le débat

La participation des étudiants aux débats est vive, ceux-ci s'engagent en général beaucoup, ce qui est bien montré par les répliques fréquentes, les objections, les revirements, la résistance dans leur point de vue.

Ainsi, au débat 1 :

- 73A (...) Moi, pour moi, c'est le "c" [/__\], même si t'as
- 75B Mais c'est pas du tout le même cas, enfin j'sais pas!
- 76A Si, si t'as cette bille là et cette bille là qui ont la même pression
- 77B Mais elles n'ont *pas* la même pression
- 78A Ben si, elles l'ont, mettons qu'elles l'ont.
- 79B Oui mais elles l'ont pas!

Au débat 3 :

- 63B ...où c'est égal, parce que sinon, on ne va plus rien comprendre. Il faut bien les mettre l'une en dessus de l'autre parce que finalement...
- 64A On n'aurait pas pensé à ça...oui mais...là...C'est ça, ces billes exerçaient une force sur le fond.
- 65B Non,... non, c'est comme ça.
- 66A Tu crois ?
- 67B Je crois.
- 68A Peut être qu'y vont exercer une force comme ça enfin j'sais pas.
- 69B Mais normalement celles-ci aussi.
- 70A Non, parce qu'elles n'atteignent pas le fond celles-ci.
- 71B Mais normalement tu devrais les avoir faites...
- 72A Non, mais là ça va pas parce que...Toute façon y en a moins.

Au débat 8 :

- B2 Moi je ne crois pas.
- A3 Mais si mais si. Attends, tes trois récipients ils ont, ils ont ...comment veux-tu faire autrement ? Tu vois ce que je veux dire...t'as trois récipients, ils ont la même surface,
- B4 ils ont la même surface, seulement...
- A5 et tu dis, ... attends, vas-y !

Au débat 9 :

- B8 : ah! oui sur le fond, oui directement sur le fond à mon avis elles n'ont pas d'actions.
- A9 : je crois pas.
- B9 : n'ont pas de pouvoir de ...
- A10 : je crois pas. Par contre si tu veux ici comme les... sur le deuxième.

Dans le cas suivant (débat 4) les étudiants résistent dans leur idée, même après intervention du professeur :

- 90P Bien entendu. La force est d'autant plus grande que la colonne est grande...
- 91A Et donc cette colonne s'ajoute à cette autre, et donc, y aura plus..
- 92P Ah non, pourquoi est-ce qu'elle se rajouterait ?
- 93A Vous êtes d'accord que c'est...
- 94P La bille qui se trouve ici, elle subit une force de celle du haut, une du bas et les latérales, si je les décompose comme ça. Donc la bille qui se trouve ici, c'est la même chose, une force venant du haut, une du bas, une de chaque côté. Et comme sur une même ligne horizontale, les forces sont les mêmes, la situation de cette bille-là n'est pas différente de celle-là, du moment qu'elles sont à la même hauteur.
- 95A Mais, y aura quand-même plus de pression sur la surface, vu qu'y a, y a plus de billes.
- 96B Ah ben oui, c'est comme...

Certaines interventions expriment une difficulté forte, très ressentie :

- A45 Eh, j'ai des problèmes avec ces trucs, moi. (débat 9)
- B43 Oui, oui d'accord, tu veux dire le...ton second récipient que t'as ici... Enfin là on a réussi à sentir le truc mais pour quantifier... (débat 8).

8.3.2 Présence des difficultés attendues et typologies de raisonnements activées

On relève quatre types de raisonnements principaux.

- 1) Dans un espace plus étroit, la pression est plus grande, parce que le liquide est "comprimé", "écrasé". (Difficulté a)
- 2) Dans le récipient avec plus de liquide il y a plus de poids, donc la force sur le fond est plus grande. En bref: "plus d'eau = plus de force sur le fond". (Difficulté b)
- 3) La pression dépend du poids de la colonne de fluide directement au-dessus du point considéré. En bref: "colonne d'eau au-dessus", "fluide sur la tête". (Difficulté c)
- 4) La pression dépend de la hauteur, à profondeur ou hauteur égale, la pression est égale. En bref : "même hauteur = même pression", "formule $\Delta p = -\rho g \Delta h$ ". (Niv p=, cas a)

Le raisonnement 1) conduit naturellement à conclure que la force est plus grande pour le récipient $c / _ \backslash$. Il est assez primitif, dans le sens que sa présence diminue rapidement avec le niveau scolaire. Dans notre enquête, on passe d'environ un tiers d'élèves au lycée jusqu'à 4%-7 % (selon les situations proposées) à la première année universitaire de filière scientifique, après enseignement. Il est évoqué ici dans un seul débat (le 5), par un seul étudiant, qui d'ailleurs change rapidement d'avis (14B) en faveur de l'idée du type 2).

Le raisonnement 2) amène à la conclusion que la force est plus grande pour le récipient $a _ /$ et plus petite pour le $c / _ \backslash$. Il s'agit d'un raisonnement *global* très répandu et persistant. Dans notre enquête parmi les étudiants de première année universitaire, il est représenté avec un pourcentage d'environ 45 %, après enseignement traditionnel.

Il est présent ici dans 6 débats sur 9, mais en général de façon très épisodique, et au début ou au milieu du débat. Seulement dans les débats 4 et 5 est-il cité assez souvent, persistant presque jusqu'à la fin. Dans les débats 2, 8 et 9 il n'apparaît qu'une ou deux fois. Dans le débat 8 il est vite écarté (11A) en faveur d'un raisonnement du type 3, soutenu par l'autre étudiant du groupe. Dans le 9 il apparaît, inattendu et rapidement éliminé, face aux difficultés croissantes d'un raisonnement du type 3). Il est utilisé jusqu'à la moitié du débat 3, parfois en termes de "nombre de billes", en référence au modèle, pour être ensuite remplacé par des discours concernant les forces.

On voit bien que l'importance et la résistance de ce raisonnement est beaucoup plus faible dans ces débats que dans les questionnaires de notre enquête, intervenant après enseignement traditionnel. Ce résultat peut être considéré comme un effet positif de la séquence, surtout parce qu'en général, même lorsqu'il est présent, ce raisonnement ne survit pas longtemps aux arguments fondés sur le modèle proposé par la séquence.

Le raisonnement 3) est le plus présent (débats 1, 2, 3, 6, 7, 8, 9) et surtout le plus actif dans les débats. Il est très souvent utilisé avec le modèle des balles de mousse, en termes de "colonnes de boules ou billes" au-dessus. Il peut être considéré aussi, dans la plupart des formulations exprimées, comme un raisonnement mixte local-global et il constitue souvent une première avancée vers un raisonnement systémique complet.

Il conduit, plus ou moins rapidement, à l'égalité des forces pour les récipients $a _ /$ et $b _ |$, mais laisse beaucoup de difficultés sur le cas $c / _ \backslash$, à cause des colonnes d'eau de différente hauteur aux bords du récipient. Parfois une amorce de raisonnement systémique, non bien maîtrisé, couplée à cette typologie, peut aussi ajouter des difficultés pour le récipient $a _ /$. Par exemple, dans le débat 9 : "les autres billes" sur les parois latérales "sont là, elles n'agissent pas *directement* sur le fond", mais en quelque sorte, de façon indirecte, par transmission, peut-être ; "d'ailleurs, elles sont là".

Rappelons que dans notre enquête par questionnaires nous trouvons que ce raisonnement est utilisé au moins par 25 % des étudiants de première année universitaire, après enseignement.

Le raisonnement 4) est utilisé comme une règle, une formule verbale ou mathématique. Il n'est pas suffisant pour que les étudiants se convainquent mutuellement, car il ne permet pas de comprendre ce qui se passe. Même s'ils formulent cette règle, les étudiants sont tout de suite prêts à la mettre en question et ils cherchent d'autres explications, plus liées à l'analyse des actions physiques (débat 1, trois fois, au début et vers la fin ; débat 5, deux fois ; débat 9, une fois au début). Ainsi au début du débat 9 :

- 12A Normalement, toutes les particules qui sont à la même hauteur sont censées être à la même pression.
- 13B Non, parce qu'on sait bien... Oui, c'est à la même hauteur, si c'est à la même hauteur au-dessus, mais ici t'as une différence, t'as plus de poids, tu vois...t'as un poids plus grand, comme t'as un peu plus de poids, ben, ça appuie plus, forcément.
- 14A Oui...logique...

On trouve aussi des affirmations du type « la pression (ou la force) est la même sur une même ligne horizontale », cette fois en référence au modèle étudié. Ce raisonnement évoque l'égalité de pression à la même hauteur, mais il est différent du précédent, parce qu'il est fondé sur une idée dynamique de transmission des modifications locales et sur l'action des forces agissant horizontalement entre les parties du liquide.

8.3.3 Utilisation des éléments du modèle

La présence d'*entités discrètes*, qui font évidente référence au modèle de la séquence, est massive dans les débats. Les étudiants parlent en termes de billes, boules ou balles, parfois de molécules ou particules, de façon interchangeable.

Dans tous les cas où une explication complète est recherchée (tous les enregistrements, et quelques feuilles de réponse sans enregistrement), et/ou où une difficulté importante se présente, des *boules jointives* apparaissent dans les dessins recueillis et dans les transcriptions des débats. Trois feuilles de réponse sans enregistrement sont sans boules ou avec boules éparées, elles accompagnent une réponse correcte, mais peu argumentée (fiches 2 et 7) ou avec une explication partiellement fautive (fiche 1, "la pression est constante dans le fluide").

En effet, tant que les boules sont dessinées ou pensées éparées et non en contact, le modèle n'est pas vraiment pris en charge dans le raisonnement des étudiants, il n'est sans doute qu'un souvenir visuel. Dès que des boules jointives apparaissent, il devient, le plus souvent, un *modèle opératoire*, qui s'active dans les raisonnements et met en mouvement une nouvelle typologie de problèmes et de solutions.

Toutefois l'utilisation de boules ne garantit pas toujours que l'analyse se démarque du raisonnement global : « il y a plus d'eau... », « il y a moins d'eau... ». Dans un cas, en effet, le débat (n° 4) reste longtemps sur une considération de l'action d'ensemble des parois obliques, sans parvenir à une solution satisfaisante.

La considération des colonnes de boules en interaction est un élément débloquent, qui aide à abandonner l'idée simpliste "plus d'eau = plus de force", mais souvent elle n'est pas suffisante, à elle seule, pour résoudre le problème.

La considération des *forces* entre les boules, la *propagation des actions* et l'image des boules qui poussent dans toutes les directions, caractéristiques du modèle proposé, apparaissent souvent dans les débats, avec un rôle important, parfois décisif, dans le dénouement du conflit. Ainsi, par exemple :

- 21C Y a des forces ...des deux côtés aussi d'ailleurs...La boule ici...celle du milieu elle la transmettait vers le bas (débat 5).
- B12 Là tu vois si tu pousses plus fort, tu vas pousser plus fort sur celle-là, celle-là poussera plus fort sur la deuxième bille, la deuxième bille poussera plus fort sur la troisième, et puis en réaction le mur va pousser sur la dernière bille et ça va de nouveau tout retourner dans ta main (débat 7).

- B33 Je veux dire quand tu prends une boule ou une molécule isolée, elle va subir et ou exercer une force égale dans les quatre directions, c'est ça qu'on avait vu aussi ... n'importe où, dans les trois directions donc ce qu'on a ici c'est, c'est que ces billes-là elles subissent une pression comme ça, donc elles vont exercer une pression sur la paroi ...
- B47 Ces billes-là exercent une pression sur les bords ici sur ces billes-là, plus ou moins importante selon la hauteur, et de ce fait-là... Ah ben oui ! C'est bon ! Parce que de ce fait là, comme les molécules exercent ... si elles reçoivent une pression d'un côté elles exercent les mêmes dans les trois dimensions, en fait la pression va être exercée... on va avoir la même pression exercée vers le bas aussi (débat 8).

La *compressibilité* des boules est évoquée dans trois débats (n° 4, 5, 6). Par exemple :

- 33A Mais, y a aussi une compression de l'eau.
- 35A Oui, de l'autre côté, l'eau sera peut-être plus concentrée ici (débat 4).
- 6B Parce que tu vois, là, ça s'écrase, c'est compressé, la boule est compressée" (débat 5)

Cette évocation demeure marginale dans les débats 4 et 5. Au contraire, dans le débat 6 la prise en compte de la compressibilité et de la *déformabilité* des balles de mousse devient essentielle pour comprendre la situation :

- A7 Parce que les boules ayant un certain poids, elles ont tendance à s'écraser donc à exercer une force latérale... horizontale sur les boules avoisinantes, cette force elle se transmet jusqu'aux parois et la paroi étant inclinée induit une force ... vers le bas.

8.3.4 Références aux situations proposées dans la séquence

Des références explicites à des situations et des raisonnements caractéristiques de la séance de présentation du modèle interviennent dans presque tous les débats. Citons les suivantes.

- L'action de la paroi comme « une main qui pousse » (débats 1, 3, 7). Par exemple : "...et puis en réaction le mur va pousser sur la dernière bille et ça va de nouveau tout retourner dans ta main." (débat 7, B12).
- L'égalité de la pression sur une ligne horizontale, par action de proche en proche (débats 1, 3, 5, 9), par exemple : "Ici en ligne cela ne change pas. La pression elle est constante en ligne horizontale." (débat 9, A24).
- La similitude avec le récipient de la séquence :
 - A30 Là tu vois, c'est dans le cas, tu vois parce qu'on avait vu, la fois passée, d'une manière, on pousse vers le plafond, et l'autre, on la pousse vers le fond, et ça c'est le premier cas, on va reprendre et le troisième c'est ...
 - B47 ... pour ce qui est d'ici, on a suivi le même chemin de raisonnement que dans le cas où on avait fait un récipient complexe la dernière fois et... (débat 8)

Parfois l'activation de ces éléments de la séquence est décisive pour surmonter un blocage dans le débat. Dans le débat 1, à la suite d'une allusion spontanée à l'action d'une main sur une pile de boule, un dénouement rapide intervient :

107B Mais pourquoi, là il y en a quand même plus d'eau au-dessus d'elles.

108P Oui, mais ici, il y a une force qui est exercée là aussi, et qui est différente de celle-là.

109B D'accord, ...on va faire...comme l'histoire de la main qui appuie, quoi, parce que la force [de la paroi] ne sera pas la même.

8.3.5 Rôle des parois

Les parois sont toujours prises en considération, même si ce n'est pas tout de suite, au début des débats.

Parfois, elles ne semblent avoir qu'une fonction de soutien ou de compensation du poids :

31A ... la pression verticale, elle va être comme ça, et à mon avis elle va être compensée par la paroi. (débat 1)

B25 c'est qu'ici toute cette colonne d'eau, tout le poids de cette colonne d'eau va s'exercer sur la surface donc il y aura la même force, et toute l'eau qu'on a sur les bords va s'exercer sur les parois. Ce qui pourrait se passer c'est que les parois explosent...[réipient _ /] (débat 8)

Ici (débat 7), l'étudiant est surpris que le professeur parle de la paroi qui pousse :

P65 La paroi qui pousse...sur la dernière boule

B66 Elle pousse ?

Dans le dialogue suivant (débat 5) les étudiants passent rapidement de la considération d'un rôle exclusivement de support des parois vers la prise en compte des forces exercées par les parois:

22A ... il y a seulement la force de pesanteur qui agit et pas la force du verre.

23C Oui, oui, oui, je sais bien qu'il n'y a pas la force du verre qui agit, mais ...

24A Si, si. Y a bien une force... de la part du verre.

25C Réaction à la force..

26A Faut voir si cette force de réaction du verre est plus forte que la pesanteur... Pour moi en fait ça serait la même chose parce que les forces de réaction du verre, quand c'est en triangle [réipient / _ \], ça compense la force de gravité perdue.

La prise en compte des forces exercées par les parois est presque toujours fondamentale pour la résolution du problème. Elle apparaît souvent au milieu ou vers la fin du débat.

43B Oui, non, elle vient appuyer là en fait, elle va appuyer sur la paroi et la paroi va appuyer là. (débat 1)

40A En fait, comme les parois de ton récipient [réipient _ /] exercent des pressions obliques vers le haut ...(débat 2)

30B Ben donc ça donne quoi en bref ? Toutes les boules appuient verticalement sur la paroi, et comme y a une réaction de la paroi, ça dévie la force vers le centre (débat 4)

Parfois ce n'est qu'après une intervention du professeur que les étudiants commencent à considérer le rôle des parois et les forces qu'elles exercent sur le liquide, ce qui entraîne vers une solution du problème :

62P : Ici [récepteur / \backslash], la différence avec le cadre A [\backslash /], le problème c'est l'absence de balle au-dessus, dans ce cas là. Il faut montrer que cette absence ne change strictement rien au cas droit [récepteur \perp] où, effectivement, j'ai des balles sur chaque, et là c'est assez clair, donc il faut que

63A : Ah! En fait la paroi ici exerce la même pression que celle-là exerce sur celle là. (débat.9)

8.3.6 Décomposition des forces : un point critique

La décomposition des forces sur deux directions perpendiculaires est peut-être connue, mais elle n'est pas toujours utilisée sans problème, loin de là. Lorsqu'elle n'est pas du tout maîtrisée, tout est bloqué (voir débat 4), le modèle est inopérant, car le modèle en tant que tel, c'est à dire la mécanique des boules, n'est pas compris.

Les expressions "pression verticale", "pression horizontale" ou "composantes horizontale et verticale" de la force apparaissent (débat 1, 2, 4), et aussi "pression oblique", "composante oblique" (débat 2), force perpendiculaire à la paroi (débat 5).

Ainsi, par exemple dans le débat 2 :

32A Donc, t'as une pression verticale qui s'exerce dessus et t'as une pression horizontale de la paroi ou une pression, non, plutôt perpendiculaire, oui, c'est des pressions perpendiculaires...Ah mais voilà! Si t'as une pression perpendiculaire, ça veut dire que ça, ça pousse comme ça, ici dans le deuxième cas [récepteur \perp], c'est tout à fait horizontal, et dans le troisième [récepteur / \backslash], ça pousse un peu vers le bas aussi, si tu la décomposes en une horizontale et une verticale, eh ben, t'as une partie qui pousse vers le bas, c'est pour ça que tes pressions seraient, euh ...

Il s'agit d'un aspect souvent décisif et qui semble mettre en difficulté les étudiants. Parfois, c'est le professeur qui intervient pour suggérer une décomposition des forces des parois (débat 7, 9), sans quoi les étudiants semblaient n'être pas en mesure de s'en sortir :

B31 Euh ... elles poussent, elles poussent vers le bas. Ben dis donc, dans le modèle, on n'a pas envisagé comment réagissaient les forces quand le plan était pas perpendiculaire au...à la ... tu vois. Ici dans le modèle qu'on a utilisé...tous les... ce plan là, il est perpendiculaire à la force.

P32 Oui, oui, c'est ça.

B33 Oui mais ici c'est jamais le cas.

P34 Oui mais on peut à ce moment là...la force sera toujours perpendiculaire au plan, mais on peut à ce moment-là la décomposer en composante verticale et en composante horizontale ...

A35 verticale et en composante horizontale. (débat 7)

103P Oui mais qu'est-ce qui physiquement permet d'avoir dans cette configuration-là qu'est ce qui physiquement permet d'expliquer que l'intensité est la même là et là? Quelle est la force ?

104A La force de contact.

105P La force de contact paroi-balle, pourquoi, parce qu'elle est en oblique et donc et donc

- il y a une composante verticale.
- 106A Ah! perpendiculaire qui est égale au poids des balles ...
- 107P qui correspond au poids de cette balle.
- 108A Ah! Oui.
- 109P Parce que ce poids-là est transmis, parce que c'est une balle de mousse, elle transmet la force qu'elle subit, verticalement elle la transmet, horizontalement à ses voisines et ses voisines, celle qui est contre la paroi transmet cette même force.
- 110A à la paroi mais ...
- 111P à la paroi
- 112A et la paroi lui renvoie ...
- 113P et la paroi lui renvoie par le principe d'action (débat 9).

8.3.7 Obstacle à la mise en oeuvre du modèle : le seuil de compétence

Il semble y avoir un minimum, un *seuil de compétence* pour bien profiter du modèle. Il faut que les étudiants soient en mesure de manipuler la mécanique élémentaire des forces, la décomposition vectorielle spécialement. En effet, dans quelques cas les étudiants n'ont pas réussi à sortir seuls de leurs difficultés, ce n'est qu'après quelques suggestions du professeur qu'ils ont dénoué leur conflit cognitif. Dans le débat 4, au contraire, même les interventions répétées du professeur n'ont pas été suffisantes pour conduire les étudiants vers une interprétation cohérente et pour eux satisfaisante de la situation :

- 78P Ah oui, la bille va exercer une force sur la paroi, qui sera perpendiculaire à la paroi, mais on peut la décomposer en une composante verticale...
- 79B Elle sera perpendiculaire ??
- 80P ...et une composante horizontale. On peut toujours décomposer une force suivant deux directions qui sont perpendiculaires.
- 81A (*marmonne*) Ah oui, ah oui, mais si, ah oui voilà ! Donc si on fait une composante verticale et horizontale, y a pas une composante oblique qui forcément ira toucher une bille du dessous.

Après un long débat, le professeur renonce :

- 90P Bien entendu. La force est d'autant plus grande que la colonne est grande...
- 91A Et donc cette colonne s'ajoute à cette autre, et donc, y aura plus..
- 92P Ah non, pourquoi est-ce qu'elle se rajouterait ?
- 95A Mais, y aura quand même plus de pression sur la surface, vu qu'y a, y a plus de billes.
- 96B Ah ben oui, c'est comme...
- 97P On, on va peut-être arrêter...

8.3.8 Bénéfices du modèle, même sans aboutissement

Il nous semble que, même lorsqu'il ne résout pas toutes les difficultés, le modèle pousse à les poser à un niveau supérieur, avec un regard différent, plus approfondi, sur la situation physique proposée. Il peut être considéré un *modèle pont*, intermédiaire, pour aller au-delà de l'idée ingénue du « tout poids », vers un raisonnement en termes d'actions réciproques, de variations locales, même si celui-ci n'est pas toujours optimal et efficace. Il demeure encore parfois des raisonnements erronés, mais ils sont moins simplistes et plus proches d'une argumentation correcte. L'utilisation du modèle active en tout cas un raisonnement plus articulé, plus puissant et productif dans la discussion entre étudiants, il donne plus d'arguments pour le débat, pour convaincre les partenaires ou résister aux attaques et aux critiques.

Dans le débat 5, par exemple, les étudiants A et B, en désaccord, démarrent avec des arguments du type "plus d'eau", "même hauteur", mais lorsque A et C évoquent le modèle des boules, le discours se déplace sur l'analyse des forces et du rôle des parois, B est rapidement déstabilisé et n'arrive plus à soutenir son opinion.

- 21C La boule ici...celle du milieu elle la transmettait vers le bas vu qu'il y avait...
- 24A Si, si. Y a bien une force... de la part du verre.
- 25C Réaction à la force..
- 26A Faut voir si cette force de réaction du verre est plus forte que la pesanteur... Pour moi en fait ça serait la même chose parce que les forces de réaction du verre, quand c'est en triangle [récipient / $_\backslash$], ça compense la force de gravité perdue.
- 27C La force de gravité perdue.
- 28B Non mais attends, tu dis clairement, c'est la même pression dans les trois ...
- 29A C'est la même pression dans les trois, ça pour être clair...
- 30B Non mais moi je pense pas comme vous.
- 31A Bon, on a quand même vu, s'il y a bien une réaction du verre, bon y réagit comme ça perpendiculaire peut-être et comme c'est réparti partout, la pression est la même pour moi.
- 32B Ouais, mais en fait...

Encore, dans le débat 8, l'étudiant A soutient d'emblée la solution "plus d'eau, donc plus de force", tandis que B prône l'égalité des forces. Dès que B utilise le modèle, ses arguments deviennent plus riches :

- B10 C'est là qu'on va en venir au modèle des boules, qu'est-ce qui va appuyer ici, c'est uniquement cette colonne d'eau, c'est elle qui va faire une force ici, donc la force sera la même que là, tu vois ce que je veux dire ? Donc ta pression aussi parce que cette paroi-là, cette, cette surface-là elle va pas éclater. Comme celle-là, si celle-là n'éclate pas elle n'éclatera pas non plus, tu vois ? Parce que qu'est-ce qui agit sur cette surface ici, c'est uniquement la colonne d'eau qui est située au-dessus, parce que tout le reste agit ici, et si tu veux, dans le cas où t'as ton truc, où t'as plus d'eau [récipient $_\backslash$ /], ça n'a aucune importance parce que toute l'eau que t'as ici elle va exercer une force sur la paroi. A la limite ce qui pourrait arriver, c'est que ton truc se casse comme ça, quoi.

Maintenant l'étudiant A recule, sans trouver d'objections significatives, ses interventions se réduisant à de courtes répliques :

- A11 Oui, ça d'accord ! Là t'as raison.
- A13 Mouais, mais c'est pas le cas.
- A15 Avec les boules !
- A17 Attends ...

Lorsque le professeur intervient, en posant une question, c'est l'étudiant B seulement qui répond. Finalement A aussi active les souvenirs du modèle :

- A30 Là tu vois, c'est dans le cas, tu vois parce qu'on avait vu, la fois passée, d'une manière, on pousse vers le plafond, et l'autre, on la pousse vers le fond, et ça c'est le premier cas [récepteur / $_\backslash$], on va reprendre et le troisième c'est..
- B31 Ah oui ! Oui ! Tout à fait, oui, oui, oui
- A32 L'eau qu'y a ici, en fait, l'eau qu'y a ici, ta paroi va avoir une pression comme ça et c'est ça qui va faire la pression vers le bas aussi, mais euh attends

On voit bien que les discours, même s'ils restent encore flous, se situent à un niveau beaucoup plus fin qu'au début.

8.4 Conclusions

On constate avant tout que l'idée simple de l'égalité de la pression à une même hauteur n'est pas suffisante pour garantir une solution complète du problème. Elle n'est pas en mesure de convaincre les étudiants. Parfois elle est acceptée d'emblée, mais ensuite mise en discussion ou rejetée, car elle ne semble pas compatible avec une analyse plus attentive en termes de forces. Il est nécessaire de parvenir à une élaboration plus fine, pour accepter finalement la solution correcte de l'égalité des forces pour les trois récepteurs.

Dans ce travail, le modèle proposé apparaît comme un outil efficace et très utilisé par les étudiants, même s'il n'est pas toujours parfaitement maîtrisé.

Souvent, l'activation de quelques éléments de la séquence est décisive pour surmonter un blocage dans le débat.

Il semble y avoir un minimum, un *seuil de compétence* pour bien profiter du modèle. Il faut que les étudiants soient en mesure de manipuler la mécanique élémentaire des forces, la décomposition vectorielle spécialement. En effet, dans quelques cas ce n'est qu'après quelques suggestions du professeur à ce sujet que les étudiants ont réussi à se sortir de leurs difficultés et résoudre leur conflit cognitif. Dans un cas, au contraire, même les interventions répétées du professeur n'ont pas été suffisantes pour conduire les étudiants vers une interprétation cohérente et, pour eux, satisfaisante, de la situation.

Même lorsqu'il ne résout pas toutes les difficultés, le modèle pousse en tout cas à les poser à un niveau supérieur, avec un regard plus approfondi sur la situation physique proposée et des raisonnements moins simplistes et plus proches d'une argumentation correcte. Il peut être considéré un *modèle pont*, intermédiaire, pour aller au-delà de l'idée ingénue du « tout poids » ou du « poids du fluide au-dessus ».

L'utilisation du modèle active un raisonnement plus puissant et productif dans la discussion entre étudiants, il donne plus d'arguments pour convaincre les partenaires ou résister aux attaques et aux critiques.

Le modèle ne devient actif et productif que lorsque les interactions entre les boules sont considérées, ce qui est montré dans les interventions des débats et dans les dessins où des boules jointives apparaissent, souvent avec des flèches indiquant des forces.

En effet, tant que les boules sont dessinées ou pensées éparses et non en contact, le modèle n'est pas vraiment pris en charge, il est plutôt un souvenir visuel qu'un *modèle opératoire*. Dès que des boules jointives apparaissent, au contraire, il s'active dans les raisonnements et met en mouvement une nouvelle typologie de problèmes et de solutions.

Cet aspect contribue à montrer aussi l'importance du caractère mésoscopique du modèle. En effet, un modèle microscopique serait incapable de rendre compte des effets du poids, en forme statique, car il faudrait alors qu'il y ait le contact entre les unités du modèle. Des boules éparses, comme des molécules, ne fonctionnent pas à cet égard. Rappelons que tout modèle microscopique nécessite la prise en charge des aspects cinétiques, sans quoi il est inefficace. Si l'on veut rester dans un modèle statique, qui prenne simplement en compte les effets de la gravité, on est obligé de passer à un niveau mésoscopique, qui laisse cachés à l'intérieur de l'unité mésoscopique du modèle (la balle de mousse, dans notre cas) les aspects cinétiques, lesquels se traduisent par une résistance élastique à la compression.

8.5 Analyses des débats 1-9

Analyse du débat 1

| | |
|----------------------|--|
| Débat 1 (B32) | Durée : 20 min |
| ENGAG | Important (estimé), voir par ex. de 71A à 84A |
| DIFF | c) 2B, 13B, 14A etc.... dessin |
| NIV p= | a) Même hauteur, même pression : 1A, 12A, 97A b) Ligne horizontale : 9b, 20B, 21A, 22B, 23A. |
| DISCO | molécules : 1A ; particules : 12A ; billes: 17B, 22B, 54B, 62B (x4), 63A, 66B, 68B, 72B, 76A |
| FORCE | 85B, 89A, 90B, 108B, 109P « forcer » : 90B (x5) |
| COMPR | |
| SEQUEN | « action de la paroi comme une main qui pousse » 109B, 110P « même pression sur une ligne horizontale » : 9B, 20B, 21A, 22B, 23A. |
| PAROI | Support : 15B, 31A Interaction : 43B, 103A, 104P |
| DECOM | 18B, 35B, 36A; "pression verticale" 31A, 27A, 30B, 40A, "horizontale" 38A |
| DENOU | 103A, 109B |
| DESSIN | Première série sans boules. Rappel du « récipient au piston », avec une ligne horizontale de boules jointives. Cas « a » $\backslash _ /$ avec une ligne horizontale de boules jointives, et une boule sur chaque paroi oblique, portant chacune un diagramme de forces à résultante tangente à la paroi. Cas « c » $/ _ \backslash$ avec un point en bas dans la partie centrale et un autre sous paroi oblique. Point d'interrogation. Réponse $a=b=c$ |

On peut proposer, pour ce débat, le résumé suivant

L'engagement des étudiants est d'emblée très important.

L'étudiant A mène la discussion tandis que B, assez rapidement convaincue de l'égalité des forces en question en $a \backslash _ /$ et $b _ _$, résiste à toutes sortes de bons arguments pour le cas $c / _ \backslash$, au motif qu'il y a moins d'eau au-dessus du fond lorsqu'on s'intéresse aux points sous les parois obliques, ainsi :

48A Donc "a" et "b"... "a" égale "b".

49B ...à cet endroit là.

50B Et alors le "c"...

51A Et alors le "c"...

52B ... Le "c"... la pression va diminuer.

53A Ben, c'est justement ça que je m'dem. Ici t'as une partie...si tu dessines le "b"...

54B Simplement déjà parce que t'as des billes en moins et que le poids est moins... appuie moins...

55A Moui.

56B Simplement pour ça ta pression va être moindre, non?

Les difficultés attendues sont patentées chez l'étudiante B, malgré la connaissance de la règle de l'égalité des pressions à un même niveau, exprimée d'emblée. L'étudiant A ne parvient pas à la convaincre, malgré un élégant raisonnement de proche en proche.

76A Si, si t'as cette bille là et cette bille là qui ont la même pression.

77B Mais elles n'ont *pas* la même pression !

78A Ben si elles l'ont, mettons qu'elles l'ont.

79B Oui mais elles l'ont pas!

80A Mettons qu'elles l'ont hein (rire), on va dire qu'elles l'ont.

81B On va dire qu'elles l'ont, d'accord.

82A Alors, si elles l'ont, celle-là et celle-là ont aussi la même pression, et donc celle-là et celle-là ont la même pression. Or ici dedans, celle-là et celle-là ont la même pression la même chose ici, celle-là et celle-là, donc la pression est la même.

83B Oui mais non parce que là ce n'est pas la même pression, là tu as une pression plus petite que là.

84A Mais justement, ça j'en sais rien, franchement pour moi je suis pas certain du tout qu'on a...

L'étudiante B amorce sa conversion lorsqu'elle fait allusion au modèle et, simultanément, emploie le terme de force pour la première fois.

85B C'est ce qu'il t'a expliqué avec ton modèle mais quand tu appuies, tu as chaque fois la force là, plus chaque fois tu additionnes les forces au-dessus, tu vois?

Après que l'étudiant A et le professeur aient parlé de la force exercée par la paroi, elle résiste encore :

105B Mais ici, elle n'ont pas la même pression, les deux.

Jusqu'à ce qu'elle s'écrie :

109B D'accord, ...on va faire...comme l'histoire de la main qui appuie, quoi, parce que la force [de la paroi] ne sera pas la même.

110P C'est exactement, c'est comme s'il y avait une main qui appuyait, mais la main n'appuie pas avec la même force ici que là.

111B OK, d'accord.

112A Ca va?

113B Oui.

En conclusion, ce débat fait apparaître les blocages attendus, et l'emploi du modèle proposé via des entités discrètes, puis beaucoup plus tardivement une analyse explicite du rôle de la paroi en terme de forces et l'allusion spontanée à « la main » du modèle proposé, allusion qui est associée à une résolution rapide et nette du conflit.

Analyse du débat 2

| | |
|----------------------|--|
| Débat 2 (A41) | Durée : 15 min |
| ENGAG | Important (estimé) |
| DIFF | b) 39B c) 21B, 33B, dessin |
| NIV P= | |
| DISCO | « billes » : 8A, 9B, 10A, 12A, ... 54A « boules » : 50A « colonne de pression » 10A, 54A |
| FORCE | |
| COMPR | |
| SEQUEN | |
| PAROI | Support : 1A, 2B, 45B, Interaction , « pression de la paroi » : 12A, 14A, 15B, 28A, 40A, 44A, 50A |
| DECOM | “pression verticale” : 14A, 18A, 24A, 25B, 28A, 29B, 30A, 50A, 51B, 52A, 54A “pression horizontale” : 15B, 16A, 18A, 19B, 20A, 24A, 54A “pression oblique” : 32A |
| DENOU | 54A B n'est pas convaincue, « moui » : 53B |
| DESSIN | Première série de dessin sans boules, seules de flèches verticales joignant la surface au fond, au-dessus des parties obliques de $a \setminus _ /$. Puis : Boules jointives, action de la paroi sur l'eau figurée par des flèches perpendiculaires aux parois, ainsi qu'une flèche partant du centre de la surface, vers le bas. Réponse « pression verticale plus forte en a qu'en b et qu'en c . » Puis : en $c \setminus _ \setminus$ la pression verticale est plus petite qu'en $b \setminus _ \setminus$... Mais puisqu'il y a une « pression de paroi oblique vers le bas la pression verticale en $c=b=a$. » Seul le terme « pression » est employé. |

On peut proposer, pour ce débat, le résumé suivant

L'action sur les parois fait son entrée immédiatement (1A, 2B) :

- 1A Tu vois la pression là...la pression, ça pousse sur les parois, ça veut dire que la pression, ici, elle sera moins grande dès qu'il y a une partie qui est perdue.
- 2B Non, pas moins grande, elle sera égale à celle...Si tu fais comme ça en disant que cette pression-là, elle s'applique sur les parois.
- 1A Tu vois la pression là...la pression, ça pousse sur les parois, ça veut dire que la pression, ici, elle sera moins grande dès qu'il y a une partie qui est perdue.
- 2B Non, pas moins grande, elle sera égale à celle...Si tu fais comme ça en disant que cette pression-là, elle s'applique sur les parois.

Cette action des parois est exprimée uniquement en terme de « pression », voire « pression de paroi », le mot « force » étant totalement absent. La pression est, à de multiples reprises, qualifiée d'horizontale, verticale ou oblique. L'idée de décomposition d'une action est donc très présente. L'obstacle attendu est exprimé assez vite (21B) :

21B Parce que là y a beaucoup d'eau. Là en bas, tandis qu'au-dessus, y a peu d'eau.

Mais d'une manière assez globale : « beaucoup, peu d'eau ».. Les éléments discrets du modèle sont bien présents mais assez peu explicitement utilisés, le raisonnement portant sur l'ensemble du liquide. Le dénouement est perceptible dès 30A, puis 50A :

- 30A La pression verticale...En fait c'est ça. Ta pression verticale, elle s'exerce aussi sur les parois du récipient [_ /] vu qu'elles sont inclinées.
- 50A De toute façon, si on dit que c'est ça, que c'est pour ça qu'elles sont égales, c'est bien qu'ici ta pression verticale est plus forte que dans le cas... ça on va dire que c'est "a" [_ /], ça "b", ça "c", donc elle serait plus forte qu'en "a" et qu'en "b" ... qu'en "c", pardon, qu'est ce que je raconte!plus forte qu'en "b" [_ /] et qu'en "c" [/ \], voilà.. Donc dans le cas "b", la pression verticale, comme ça, vers le bas voilà, la pression de tes boules, quoi, que t'en as plus...mais que ce serait compensé par euh... une pression des parois alors qu'ici dans le cas "b" ...

Il s'affirme en 54A avec la reprise de l'idée de « colonnes de pression », déjà utilisée en 10A puis oubliée ensuite : ce retour à un peu d'analyse locale peut expliquer le déclenchement du dénouement. Très peu explicite cependant, il laisse l'étudiant B dans sa perplexité initiale.

- 54A (...) Et dans le cas "c" [/ \] y a la pression verticale et il y a la pression horizontale...la pression verticale là de tes colonnes de billes est plus petite qu'en "a" [_ /] et qu'en "b" [_ /], vu qu'il y a moins d'eau, mais... la pression. En fait dans le premier il y a plus d'eau, ... dans le deuxième il y a moins d'eau, ...oblique, ...vers le bas. Je trouve ça logique, je comprends maintenant
- 55P Ca va, tu as tout noté
- 56A "c" = "b" = "a", voilà!

En conclusion, ce débat fait apparaître les blocages attendus, et l'emploi du modèle proposé via des entités discrètes. Ces éléments discrets sont assez peu explicitement utilisés dans le raisonnement. L'analyse, au début très globale et centrée sur l'action des parois, se débloque avec un retour sur l'idée de colonne, ceci dans une forme rapide et peu explicite qui laisse l'un des partenaires dans la perplexité.

Analyse du débat 3

| | |
|----------------------|---|
| Débat 3 (B52) | Durée : 20 min |
| ENGAG | Important (estimé), voir de 58 à 79 |
| DIFF | b) 12A, 13B, 21B, 25B, 38A, 45B, 46A, 60A c) 41B, 76A, 77B, 101P, 107B |
| NIV p= | « même force ou pression sur une ligne horizontale » : 89P-90B, 101P |
| DISCO | « billes » : 6A, 13B, 22A, 25B, 50A, 56A, 59B, 60A, 64A, 77B, 78B, 84B, 85P « boules » : 21B, 22A, 34P, 95P, 101P(x2), 103P |
| FORCE | 6A, 25B, 26P, 40A, 62A, 64A, 68A, 74A, 76A, 79P, 81P, 86B, 87P, 90B, 94A, 95P, 97P, 99P, 101P (x3), 103P, 105A, 108A, 110A, 111B |
| COMPR | |
| SEQUEN | « action de la paroi comme une main qui pousse » : 87P « même force ou pression sur une ligne horizontale » : 89P-90B, 101P |
| PAROI | Interaction : 82B, 83P, 85P, 97P, 99P, 110A, 101P, 108A (la force de la paroi), 110A (force de la paroi), 111B |
| DECOM | |
| DENOU | 105A, 109B : « mouais » pas très convaincu, puis 111B « OK, ...force exercée par la paroi aussi. » |
| DESSIN | Récipients sans boules : 1 [_ /], 2 [_], 3 [/ _] . Puis, récipients avec boules jointives, surtout en surface, flèches « mg » en surface, et réponse 1=2>3 Une autre série de récipients intégralement remplis de boules jointives, flèche « P » au centre, et réponse 1=2=3 « car il ne faut pas oublier la force exercée par la paroi ». |

On peut proposer, pour ce débat, le résumé suivant

Ce débat très vite posé en terme de force et de nombre de billes ne fait intervenir les parois qu'à la réplique 43B ; encore s'agit-il de boules qui appuient sur une paroi, et non l'inverse.

- 43B Parce que les autres y appuient sur les parois et pas sur...
- 44A Oui, c'est vrai, ça...ça on n'avait pas compris...
- 45B Mais c'est quand même le 3 qu'a le moins, hein!
- 46A Ouais, c'est le 3 qui en a le moins.

Mais le débat reste longtemps centré sur l'ensemble des billes, considéré globalement, conformément au dessin où le poids P est représenté au milieu des billes

- 59B C'est plus agréable que là... on a toutes les billes..
- 60A Le problème c'est que les billes je suis sûre qu'elles n'ont pas la même taille, faudrait faire vraiment juste, compter le nombre de billes...

L'étudiant B soupçonne les limites de ce point de vue et tente une analyse plus locale en 63B puis en 77B, réplique qui suit l'expression de la difficulté attendue :

63B ...où c'est égal, parce que sinon, on va plus rien comprendre. Il faut bien les mettre l'une en dessus de l'autre parce que finalement...

76A Son simple poids exerce une force...sauf d'accord qu'y a moins de force parce qu'y a moins de billes au-dessus.

77B Regarde, en fait quand tu remotes, si je comprends bien ce système, ça va faire en fait...y a de moins en moins de billes qui exercent la force... mais y a de moins en moins de billes qui arrivent à toucher en bas, tu as raison. En fait, c'est la forme qui est...parce qu'y a de moins en moins de billes... qui arrivent au fond...

L'arrivée du professeur catalyse le dénouement. Il provoque chez l'étudiant B une allusion à la force exercée *par* une paroi, cette fois :

81P Et quelles sont les autres forces qui s'exercent sur elle, sur cette bille-là ?

82B La paroi de côté.

Ses questions sur la semaine précédente sont l'occasion de voir que les résultats sont bien mémorisés :

89P Et qu'est-ce qu'on avait vu, la semaine dernière, en ce qui concerne toutes les billes qui se trouvent sur une même ligne horizontale ?

90B Elles ont les mêmes forces.

91P ...horizontales, et verticalement ?

92A C'est que le poids.

93P Si on se rappelle le fameux récipient là, hein, avec une partie qui était plus haute que l'autre, ... oui, c'est ça, alors ici qu'est-ce qui y avait en ce point là ?

94A C'était la force exercée par le piston moins la somme des poids.

Cela suffit pour l'étudiant A, alors que B ne rejoint qu'in extremis l'accord sur la solution avec le commentaire 111B, apparemment convaincue.

105A Donc la force exercée est la même dans les trois cas.

106P Oui.

107B Moi j'aurais dit que 1 était égal à 2, mais que 1 et 2 étaient plus grands que 3.

108A Non, parce que... plus la paroi, y a la force de la paroi.

109B Mouais.

110A 1 égal à 2 égal à 3, quoi ! A cause de la force de paroi.

111B Mouais...OK, y a une force exercée par les parois aussi.

112A Ca veut dire que 1 égal à 2 égal à 3.

113P Bon, voilà.

En conclusion, ce débat fait apparaître les blocages attendus, et l'emploi du modèle proposé via des entités discrètes, sans plus. L'analyse, très globale au début, se débloque avec un retour sur l'idée de colonne et une analyse explicite du rôle de la paroi en terme de force exercée *sur* les boules.

Analyse du débat 4

| | |
|----------------------|--|
| Débat 4 (A11) | Durée : 15 min |
| ENGAG | Important (estimé) |
| DIFF | b) 1A, 73A, 87A, 91A, 95A |
| NIV p= | « même force ou pression sur une ligne horizontale » : 70P, 76P |
| DISCO | « boules » : 2B, 7A, 22A, 43B, 50B, 64P, 63B ... « billes » 15A, 48B, 53P, 54A, 65A, 66P, 67A, 68P, 87A, 89A, 94P |
| FORCE | 14P, 17A, 20B, 30B, 38B, 43B, 45B, 49P « réaction » : 17A, 22A, 27A, 28B, 30B, 40A, 45B, 48A |
| COMPR | 15A, 33A "Mais, y a aussi une compression de l'eau", 35A "Oui, de l'autre côté, l'eau sera peut-être plus concentrée ici" |
| SEQUEN | « même force ou pression sur une ligne horizontale » : 70P, 76P |
| PAROI | Interaction : 12B, 30B, 45B, 85B |
| DECOM | 14P, 25A, 78P, 80P, 86P, « force, comp. horizontale/verticale » : 75B, 81A « pression/composante oblique » : 60A, 81A |
| DENOU | |
| DESSIN | Série sans boules sauf en a [_ /], avec lignes de boules jointives, deux verticales (une au centre et une à mi-chemin de la paroi oblique) et une oblique, le long de la paroi, sans connexion horizontale entre les lignes. Un diagramme de forces à résultante tangente à la paroi, vers le bas, en bas de la paroi oblique, un autre sans erreur de direction au milieu de la paroi oblique. |

On peut proposer, pour ce débat, le résumé suivant :

Seul point traité ici : le cas $a \setminus _ /$, et sa comparaison avec $b _ _$. La difficulté attendue est exprimée d'emblée, sous forme globale :

- 1A Toute façon, moi je dirais bêtement avec le poids, t'as plus de poids sur
- 2B ... les petites boules..

Un tiers du débat fait du sur-place autour de l'analyse de la force, ou réaction, de la paroi oblique. Impossible de décomposer l'action de la paroi en composantes horizontale et verticale, malgré l'intervention précoce du professeur :

- 14P On peut toujours décomposer cette force en une composante horizontale et une composante verticale. Si chaque fois que...des forces, on les décompose en verticale et horizontale de façon à revenir ...

La difficulté se précise avec les répliques suivantes :

- 21B A la limite, on peut dire que, ça presse chaque fois sur euh... en diagonale
- 30B Ben donc ça donne quoi en bref ? Toutes les boules appuient verticalement sur la paroi, et comme y a une réaction de la paroi, ça dévie la force vers le centre ...

Le blocage est encore présent à la fin du deuxième tiers du débat, avec, en réplique 71B, un quasi-rejet de la règle d'égalité des pressions à un même niveau :

- 65A Et, est-ce que elles n'appuieraient pas sur les petites billes juste en dessous ?
 66P Ah ! Toutes les billes poussent l'une sur l'autre.
 67A Donc du coup, ça va se transmettre de toute façon à la petite bille ici...
 68P ... bille ici, qui, elle, de toute façon, subira une force qui est égale au poids de toute la colonne qui est au-dessus.
 69A En plus.
 70P Ah! non pas en plus. On a bien vu la semaine dernière que sur un plan, sur une ligne horizontale, toutes les forces sont les mêmes.
 71B Ca, c'est vérifié, ça ? Que la pression ici est égale à celle-là, ça, c'est vérifié expérimentalement ??? ..

Un espoir pointe avec la réplique 81A :

- 81A (*marmonne*) Ah oui, ah oui, mais si, ah oui voilà ! Donc si on fait une composante verticale et horizontale, y a pas une composante oblique qui forcément ira toucher une bille du dessous.

Espoir vite dissipé :

- 83B Oui, m..., tout à l'heure, ces billes n'exercent aucune force...sur le fond, enfin, c'est quand même le poids qui agit, c'est la seule force qui agit...

Un échange ultérieur et le dessin confirment que la ligne de boules oblique et une autre verticale sont comprises comme ajoutant leur poids au confluent, sur la paroi oblique.

- 91A Et donc cette colonne s'ajoute à cette autre, et donc, y aura plus..
 92P Ah! Non, pourquoi est-ce qu'elle se rajouterait ?
 93A Vous être d'accord que c'est...
 94P La bille qui se trouve ici, elle subit une force de celle du haut, une du bas et les latérales, si je les décompose comme ça. Donc la bille qui se trouve ici, c'est la même chose, une force venant du haut, une du bas, une de chaque côté. Et comme sur une même ligne horizontale, les forces sont les mêmes, la situation de cette bille-là n'est pas différente de celle-là, du moment qu'elles sont à la même hauteur.
 95A Mais, y aura quand même plus de pression sur la surface, vu qu'y a, y a plus de billes.

Après 29 interventions, le professeur renonce.

On note au passage une allusion à la compressibilité de l'eau :

- 33A Mais, y a aussi une compression ...de l'eau ...
 34B Ici ?
 35A Oui, de l'autre côté, l'eau sera peut-être même plus concentrée ici, du coup, ...
 36P ...plus concentrée, n'oubliez pas que l'eau est quasi incompressible, hein ?
 37A Ah non ça ne marche pas parce que...
 38B Si y a une force centripète, il faut quand même que...
 39P Oh! centripète, c'est pas... parce qu'y a pas mouvement, hein.

En conclusion, ce débat fournit un exemple extrême de blocage. L'impossibilité d'une analyse découplée entre directions horizontale et verticale bloque toute solution du conflit généré par la difficulté attendue. La mécanique des boules n'est pas du tout maîtrisée. La figuration de la ligne de boules oblique au contact de la paroi catalyse sans doute une analyse causale : l'effet oblique est compris comme s'ajoutant à l'effet vertical. Non maîtrisé, le

modèle n'est d'aucune utilité. Aucun autre chemin n'est trouvé, pas même la règle apprise mais négligée, voire rejetée ici, celle de l'égalité des pressions à un même niveau du liquide.

L'allusion à la compressibilité de l'eau est peut-être une tentative pour mettre envers et contre tout « plus de poids » là, à l'angle entre fond et paroi, où le professeur dit que c'est la même pression qu'au centre de la base du récipient.

Analyse du débat 5

| | |
|----------------------|---|
| Débat 5 (A42) | Durée : 46 interventions, environ 10 minutes |
| ENGAG | Débat serré, besoin d'approfondissement (11A), plusieurs doutes et changements de solutions 8B, 12B, 10C, 29A |
| DIFF | a) 4B, 6B b) 7A, 14B, 15A, 33A, 39A, 41A |
| NIV p= | Même hauteur, même pression : 8B, 46C |
| DISCO | « Boules »: 6B, 21C |
| FORCE | 24A, 25C, 26A, 45A |
| COMPR | 6B "Parce que tu vois, là, ça s'écrase, c'est compressé, la boule est compressée" |
| SEQUEN | La boule pousse, transmet la force 21C |
| PAROI | Support : 22A, 23C, Interaction : 24A, 26A, 31A, 43A |
| DECOM | 26A, force perpendiculaire à la paroi: 31A, 42C |
| DENOU | Basé sur le rôle des forces des parois |
| DESSIN | Pas de dessin dans ce groupe |

Cet enregistrement n'est pas trop long, il y a 46 interventions, la plupart de une ou deux lignes, mais le dialogue est serré entre les trois étudiants, surtout A et C.

Beaucoup de doutes sont exprimés, avec des changements d'avis parfois rapides.

L'étudiant B démarre avec l'idée que la pression est plus forte dans le récipient /__\ :

6B Parce que tu vois, là, ça s'écrase ... c'est compressé, la boule est compressée.

Tandis que A objecte tout de suite que

7B ... ça serait l'inverse parce qu'ici, le poids de l'eau est moins important que si le truc est dans un triangle renversé [récipient _/_].

On trouve ici d'emblée deux sources d'erreur typiques. Après une pause de réflexion, l'étudiante B change d'idée et fait appel à la règle «même hauteur = même pression», idée que A trouve «pas bête», mais que C, à sa première intervention, trouve «trop simple, tu vas chercher plus loin» (10C), remarque sur laquelle tous les trois sont d'accord et qui fait repartir le débat. La première solution de B semble désormais écartée et le débat se passe entre les deux idées plus fortes : "plus d'eau, donc plus de poids et plus de force" ou "même hauteur, donc même pression", en cherchant une explication qui puisse les rendre compatibles. La situation commence à se débloquer lorsqu'ils introduisent *les forces exercées par les boules entre elles et avec les paroi* :

21C Y a des forces ...des deux côtés aussi d'ailleurs...La boule ici...celle du milieu elle la transmettait vers le bas vu qu'il y avait...

26A Parce que les forces de réaction du verre, quand c'est en triangle [récipient /__\], ça compense la force de gravité perdue.

Les doutes et les revirements continuent, ce qui montre la résistance de l'idée que la force

sur le fond soit égale au poids:

38C Donc le poids

39A Le poids, comme si...si le poids est plus important vu qu'il y a plus d'eau...

41A Donc, ça c'est plus grand, ici le volume d'eau est plus grand qu'ici qui est encore plus grand ici, le poids vu que la densité est la même...le poids est plus important, vu que c'est la même surface ...ici il y aura plus de pression.

Finalement, les étudiants A et C trouvent un accord sur le rôle *des forces des parois, perpendiculaires*, qui font que la pression est la même.

42C Ici il y a une pression qui s'exerce du fait que la paroi...non pas comme ça j'exagère... donc y a une perte...tout est rectiligne, perpendiculaire à la surface.

44C Ben oui ben c'est ce que je dis... tu as la même pression dans les trois récipients.

45A Et quoi ici tu aurais la même pression parce que justement le verre exerce une force contraire...une force de réaction, quoi.

Conclusion

On trouve ici l'idée, assez primitive, que la pression est plus forte dans un endroit petit, étroit, parce que le fluide est "écrasé", "comprimé". Mais elle est rapidement écartée, tandis que s'affirme longtemps l'idée "plus d'eau, donc plus de force". La règle "même hauteur, donc même pression" est subitement évoquée, mais elle est considérée trop simpliste et le débat cherche à la réconcilier avec l'intuition globale "plus d'eau=plus de force", ici assez résistante.

Le modèle est évoqué assez tôt (6B), mais la situation ne commence à se débloquer qu'après la considération des forces exercées par les boules entre elles et avec les parois (21C). Le dénouement arrive encore plus tard (42C), avec la prise en compte de la direction des forces des parois, qui font que la pression est la même pour les trois récipients.

Analyse du débat 6

Il s'agit seulement de la partie finale du travail du groupe ; le débat est entre l'enseignant B, assistant à la séance, et l'étudiant A. Il n'y a que 13 interventions, c'est presque toujours A qui parle et relate aussi la discussion précédente.

L'enseignant déclare au début (B2) de l'enregistrement que la pression est la même dans les trois récipients. L'étudiant exprime son accord, mais il évoque encore l'idée que

A5 Ce qui compte, c'est la hauteur de liquide au-dessus de l'endroit où on calcule la pression.

Il exprime alors ses doutes sur la possibilité de bien expliquer la situation par le modèle des balles de mousse :

A5-A7 On s'est dit que... le modèle des boules euh... explique très bien le fait que la pression augmente avec la hauteur de liquide mais... que la pression est indépendante de la forme du récipient...eh bien... avec le modèle des boules en mousse, nous, on a du mal à l'expliquer ... aux extrémités, pas au milieu, bon, si on compte les boules au-dessus y en a moins donc on pourrait se dire...y a moins de pression.

Mais tout de suite, dans la même intervention, l'idée que les boules ont un poids, *s'écrasent* et transmettent donc des forces latérales, provoque le dénouement complet et convaincu :

A7-A9 eh! bien, parce que les boules ayant un certain poids, elles ont tendance à s'écraser donc à exercer une force latérale...horizontale sur les boules avoisinantes, cette force elle se transmet jusqu'aux parois et la paroi étant inclinée induit une force, vers le bas.

Ici c'est la *compressibilité*, la *déformabilité* des balles de mousse qui devient essentielle pour comprendre la situation et rendre cohérents les différents points de vue.

Le raisonnement sur les boules est accompagné par cinq dessins de récipients avec des boules en contact, les trois récipients proposés et la répétition du récipient /__\ deux fois. Sur ces deux derniers dessins, des flèches représentent les forces horizontales exercées par une boule, située au centre du récipient, sur les boules voisines, et des forces exercées par d'autres boules, verticalement vers le bas et sur une paroi latérale.

Conclusion

Dans ce morceau de débat, on part déjà avec l'affirmation que la pression est la même dans les trois récipients, mais des doutes apparaissent, liées à la conception du "fluide sur la tête", selon laquelle ce qui compte, c'est la hauteur de liquide directement au-dessus du point considéré. Le modèle est évoqué et utilisé, mais ne change pas la situation tant qu'on se limite à remplacer l'eau par des boules empilées.

Le dénouement, entier et convaincu, arrive avec la considération que les boules *s'écrasent*, se déforment et transmettent donc des forces latéralement, jusqu'aux parois.

Analyse du débat 7

| | |
|------------------------|---|
| Débat 7 (B14-4) | Durée : 72 interventions, environ 15 minutes |
| ENGAG | Il y a un grand effort pour surmonter les difficultés (B4, B12, B43), ils refont le dessin (A54), ils utilisent des "billes" colorées, interrogent le professeur (B31). |
| DIFF | c) B4, B6, A9, A55-B60, B62: est la difficulté plus importante pour eux. |
| NIV p= | |
| DISCO | "Billes" tout de suite (B2, B12, B17) et très souvent à partir de A26. |
| FORCE | B4, pousser (B12), B31 |
| COMPR | |
| SEQUEN | Propagation des actions, mur et main: B12 |
| PAROI | Le rôle est plutôt de support, de blocage des forces (B12, A42, B43). Cela jusqu'à l'intervention du professeur, qui suggère que la paroi pousse, exerce des forces sur l'eau, ce qui surprend l'étudiant B: «Elle pousse ?» (B66). |
| DECOM | A30, P34 et suite |
| | |
| DENOU | Basé sur le rôle des forces des parois, mais par l'aide du professeur. |
| DESSIN | D'abord la figure des trois récipients, avec des points-billes non en contact, après des dessins pour les cas $a \setminus _ /$ et $c \setminus _ \setminus$, avec des boules en contact. Ils dessinent en vert les boules qui sont sur la verticale du fond et en rouge les autres. Des petites flèches indiquent les forces. A côté des dessins il y a un texte explicatif, avec la conclusion finale: $p_a = p_b = p_c$ et "les trois forces sont égales". |

La plus grande partie du débat est centré sur l'idée que *la pression est due au liquide au-dessus et le poids se transmet du haut vers le bas verticalement*, ce qui crée des difficultés surtout dans le cas du récipient c: $\setminus _ \setminus$.

Le modèle est tout de suite évoqué, en termes de "billes" (B2, B12, etc.):

B12 ... là tu vois si tu pousses plus fort, tu vas pousser plus fort sur celle-là, celle-là poussera plus fort sur la deuxième bille, la deuxième bille poussera plus fort sur la troisième, et puis en réaction le mur va pousser sur la dernière bille et ça va de nouveau tout retourner dans ta main... Y aura de toute façon un équilibre parce que le mur oppose une résistance égale ...à la force que tu exerces.

Déjà en B4, le problème est posé du récipient c, où, vers les côtés, *il y a moins de "billes" au-dessus*:

- B4 Dans notre modèle, t'as juste des forces verticales et horizontales, t'as pas de force en diagonale.. enfin de biais. Ici tu considères que des forces verticales et horizontales, donc si tu prends le modèle au pied de la lettre, dans le c $\setminus _ \setminus$ là... euh... tout ce qu'y a au-dessus de la surface applique euh sur le fond une force égale aux autres récipients, mais sur les bords de la surface euh du verre c, du bol c, eh ben y a moins de poids... donc déjà la force, c'est pas homogène sur le fond
- A5 c'est pas homogène sur le fond pour le a et le c... pour le c, pourquoi ?
- B6 Ben parce qu'il y a rien au-dessus...sur les bords du fond, y a pas autant d'eau qu'au milieu.

Dans B4, l'étudiant pose une difficulté ou un manque du modèle, parce que dans la séquence, on s'est concentré sur les actions verticales et horizontales, sans avoir le temps de traiter des actions obliques. Cette difficulté est reprise en B31, lorsque le professeur intervient (P34) et évoque la décomposition des forces. Il semble, à ce point du débat, que l'égalité des forces entre a et b est décidée, (38-42), parce que "les billes en rouge exercent une force sur la paroi et donc pas directement" sur le fond. Mais un doute revient:

B43 Pas directement ou pas du tout? Parce qu'après il va falloir dire si la pression est la même sur le fond de a et de b . Si c'est pas directement, c'est qu'y a quand même une influence sur le fond, donc la force risque d'être différente.

La décision finale sur ce cas arrive en A46, et il reste à examiner le récipient c / \backslash .

Après un malentendu sur les dimensions des fonds des récipients (ils refont le dessin plus correctement), ils concluent qu'en c la force est plus faible, parce que la pression diminue vers les extrémités du fond, comme cela avait déjà été dit au début, en B4:

B60 et ici elle [la pression] va diminuer progressivement.

P61 Et pourquoi est-ce qu'elle va diminuer progressivement ?

B62 parce qu'il y a moins de boules qui pèsent...

Ici, il semble vraiment que les deux étudiants n'arrivent pas à s'en sortir, mais il suffit que le professeur intervienne et suggère le rôle dynamique des parois, qui poussent sur l'eau ou sur les boules, pour convaincre, même si les étudiants semblent bien surpris de cette action de la paroi:

P63 Oui, y a moins de boules qui pèsent, mais qu'est-ce qu'il y a au-dessus de la dernière boule ?

A64 La paroi.

P65 La paroi qui pousse...sur la dernière boule

B66 Elle pousse ?



A67 Ah! oui, elle

Conclusion

La plus grande partie du débat est centrée sur l'idée du "fluide sur la tête", selon laquelle la pression est due au poids du fluide au-dessus, ce qui crée des difficultés surtout dans le cas du récipient c : / \backslash .


Le modèle est tout de suite évoqué (B2), mais il n'est pas résolutif tant qu'on se limite à remplacer l'eau au-dessus avec des boules ou billes au-dessus. Le cas a \backslash / est relativement vite résolu (A46), mais sur le récipient c les étudiants n'arrivent pas à s'en sortir seuls. L'intervention du professeur devient résolutive, lorsqu'il mène les étudiants à considérer le rôle des forces exercées par les parois (P65).

Analyse du débat 8

| | |
|------------------------|---|
| Débat 8 (B14-2) | Durée : 50 interventions, environ 15 minutes |
| ENGAG | Contraste initial vivace (B1-A11), <i>sentir</i> la solution, mais aussi la <i>quantifier</i> (39, 43) |
| DIFF | b) A6 c) B10, B12, B18 |
| NIV p= | |
| DISCO | "Boules" B10, A15, B16, B33 (aussi "molécule"), "billes" B47 |
| FORCE | |
| COMPR | |
| SEQUEN | On pousse vers le plafond ou vers le fond A30, B33 Boules qui poussent dans toutes les directions B33 Comme le récipient complexe de la séquence B47 |
| PAROI | Support : B10, B20, B25; Interaction : A32, B33, B39 |
| DECOM | B47 |
| DENOU | Basé sur le rôle des forces des parois et sur les forces exercées par les boules dans toutes les directions B47 |
| DESSIN | Ils font d'abord les trois récipients, sans boules, et sur <i>a</i> et <i>c</i> y ajoutent des dessins de récipients à parois verticales  , pour faire des comparaisons. Ensuite, ils dessinent les trois récipients, de dimensions plus grandes qu'auparavant, avec des files horizontales et verticales de boules jointives. Sur <i>c</i> /  , ils marquent des flèches pour indiquer les forces exercées par les boules sur une paroi, forces croissant vers le bas, comme dans un barrage. |

Le débat démarre avec un contraste immédiat:

- B1 La pression et la force c'est la même chose.. dans les trois récipients t'as une même surface. La pression, c'est la force sur la surface, donc si la pression est la même, la force est la même.
- A2 Moi je ne crois pas.
- B3 Mais si mais si. ...

Pour l'étudiant A la force est plus grande en *a* / , "*parce qu'il y a plus de liquide, il y a un plus grand poids*" (A6). L'étudiant B essaie de le convaincre, en faisant appel tout de suite au "modèle des boules" (B10) et à l'idée que *la pression est due à la colonne de liquide au-dessus et le poids se transmet du haut vers le bas verticalement* :

- B10 ... c'est là qu'on va en venir au modèle des boules, qu'est-ce qui va appuyer ici, c'est uniquement cette colonne d'eau, c'est elle qui va faire une force ici, donc la force sera la même que là, tu vois ce que je veux dire ? ... Parce que qu'est-ce qui agit sur cette surface ici, c'est uniquement la colonne d'eau qui est située au-dessus, parce que tout le reste agit ici, et si tu veux, dans le cas où t'as plus d'eau, ça n'a aucune importance parce que toute l'eau que t'as ici elle va exercer une force sur la paroi ...
- A11 Oui, ça d'accord ! Là t'as raison

On voit que l'étudiant A est vite convaincu de l'égalité des forces en $a \setminus /$ et $b _ |$, il reste à débattre sur le cas $c \setminus /$, plus difficile :

- B12 Par contre, y faut se poser la question ici [récipient $\setminus /$] parce que là t'as moins d'eau et si tu prends la colonne, ben là t'as un vide. Parce qu'on avait fait ce raisonnement là, là c'est bon parce que l'eau qu'y a ici agit sur ces parois-là, mais là y a un manque d'eau, là, tu vois. Donc la force ou la pression devrait être moins forte ici.
- B14 ... Attends, ce qu'on peut essayer de faire c'est quand même de faire ça à partir du modèle...
- A15 Avec les boules !
- B16 Parce que... Attends, attends... Imagine, dans celui-là... On va faire ça voilà, alors si tu mets... tes boules ici... t'en as autant ici, hop hop hop hop hop hop ...

L'étudiant B semble déjà convaincu que les forces sont égales (B23), mais il n'arrive pas bien à l'expliquer.

Ils font référence plusieurs fois à la séquence, même dans certains détails :

- A30 ... on avait vu, la fois passée, d'une manière, on pousse vers le plafond, et l'autre, on la pousse vers le fond, et ça c'est le premier cas, on va reprendre ...

C'est justement ici, en analogie avec les exemples de la séquence, que se déclenche l'idée que les boules exercent des forces dans toutes les directions et que les parois exercent une force, une pression, aussi vers le bas, dans le cas $c \setminus /$ (A32, B33). L'idée se clarifie peu à peu, jusqu'à devenir nette vers la fin :

- B47 Ces billes-là exercent une pression sur les bords ici sur ces billes-là, plus ou moins importante selon la hauteur, et de ce fait-là... Ah ben oui ! C'est bon ! Parce que de ce fait là, comme les molécules exercent ... si elles reçoivent une pression d'un côté elles exercent les mêmes dans les trois dimensions, en fait la pression va être exercée... on va avoir la même pression exercée vers le bas aussi.

Une remarque de B est assez intéressante :

- B43 ... Enfin là on a réussi à sentir le truc mais pour quantifier...

Cette distinction entre *sentir* la solution d'un problème, d'une situation physique, et *quantifier*, exprime bien une démarche typique d'apprentissage et d'étude. C'est une distinction qu'on peut rapprocher de celle, déjà évoquée, entre *calculer* et *comprendre*.

Conclusion

Le contraste est immédiat entre les deux étudiants, porteurs l'un de la conception "plus de liquide=plus de force sur le fond", l'autre de celle de "la colonne de fluide au-dessus", mais le second gagne rapidement (A11) et l'égalité des forces est établie pour les cas $a \setminus /$ et $b _ |$.

Le cas $c \setminus /$, bien plus difficile, est résolu avec l'utilisation systématique du modèle. Le dénouement final arrive en évoquant une analogie avec les exemples traités dans la séquence, qui déclenchent enfin l'idée que les boules exercent des forces dans toutes les directions et que les parois exercent une force, avec une composante verticale, vers le bas.

Analyse du débat 9

| | |
|----------------------|---|
| Débat 9 (B22) | Durée : 117 interventions, environ 20 minutes |
| ENGAG | Débat serré entre A et B (14-25): "je crois pas", "mais non!", "Ah! Oui" Difficulté du problème évoqué par A (53, 90) |
| DIFF | b) 38 c) 25, 27, 86, mais présente diffusément un peu partout |
| NIV p= | Même hauteur, même pression : 3 Ligne horizontale 5, 47 |
| DISCO | "billes" 13, 25, 26, 37, 41, 49, 69, "balles" 84, 102, 106 |
| FORCE | 13 et suite |
| COMPR | |
| SEQUEN | Ligne horizontale 5, 47; propagation des actions 55, 88 |
| PAROI | Support: dans le cas _ / les billes latérales n'agissent pas <i>directement</i> sur le fond (16), peut-être poussent en oblique vers le fond (13, 37, 41, 49) Interaction: 63, 69, 99, 103, 112 |
| DECOM | 57, 105 et 109 (professeur), 106 |
| | |
| DENOU | 27: $p_c < p_b$; 69: presque résolu, 75: force paroi = force petite colonne d'eau, 79-80: bilan des forces, 102: décisif rôle des parois |
| DESSIN | pas de dessins pour ce groupe |

Au début les deux étudiants semblent déjà sûrs que la pression est la même au fond des trois récipients, parce que

1A : de toute façon la hauteur dans les trois bacs c'est la même chose.

3A: ... la pression augmente avec la hauteur mais ici comme la hauteur est pareille, il n'y en a pas.

13A : Les trois fonds sont égaux, donc de toute façon le premier et le dernier pour moi c'est pareil. Sur le fond, on a la même pression.

Mais, dès qu'ils commencent à raisonner sur la figure, les doutes commencent et augmentent, ce qui montre que l'idée "égale hauteur=égale pression" est plutôt un automatisme, une règle qui n'est pas bien liée à une analyse de la situation physique :

13A : ... A moins que les billes qui sont sur le côté poussent aussi. Mais non, même si elles poussent comme cela, les autres qui sont de l'autre côté ...

14B : Non mais le fait qu'elles sont là, c'est quand même que c'est différent.

25A : Regarde, ici les petites billes d'eau ce sera dans le coin. Il n'y aura pas, il n'y a pas une colonne d'eau au-dessus. Il y a juste la paroi et une bille dans le coin.

27A : oui d'accord justement *la pression elle augmente avec le poids de l'eau qui est au-dessus. Mais ici, il n'y a pas de poids au-dessus* [cas / _ \]. Tu vois? Ici, il n'y en a pas, donc pourquoi ici la pression elle est plus basse, elle est plus petite là aussi

Après avoir énoncé la règle, ils n'arrivent pas à se faire une idée sur cette question : *comment peut-il arriver* que la pression soit effectivement égale ? La conception du "fluide sur la tête", selon laquelle *la pression est due à la colonne de liquide au-dessus* du point considéré, crée des difficultés pour la compréhension du cas c / _ \.

A ce point, les étudiants semblent vraiment déstabilisés :

- 31A: Attends. Non; Plus petite que le premier, ça c'est pas possible
32B : Non c'est
33A : C'est ça le problème
34B : Non c'est, tu t'es gourée, c'est plus grand. Egale dans les trois
35A : ah oui, oui, oui
36B : et plus grand dans le premier [$\backslash _ /$], plus grand dans le deuxième [$_ _$]
37A : Je me demande c'est pas plus grand dans le A? ...

D'emblée l'autre source typique d'erreur "*plus de liquide = plus de force sur le fond*" fait son apparition :

- 38B : Est-ce que tu crois que le volume de l'eau, cela change quelque chose? Parce que quand tu regardes, je vais te refaire le dessin avec les bonnes proportions à la base, et donc le volume le plus grand c'est d'abord le 1 [$\backslash _ /$], puis le *b* et puis le *c*,
40B : donc si le volume a une importance, alors c'est le 1 qui est privilégié, le *b* qui ... On l'avait refait l'autre fois ce calcul là. Donc

Maintenant le problème se pose de comprendre quel peut être le rôle de l'eau, des "billes", qui se trouvent au-dessus des parois latérales, dans le cas $a \backslash _ /$, si elles ont quelque effet sur le fond, si leur poids est "bloqué" par la paroi latérale ou s'il agit en quelque sorte, par exemple moyennant une transmission oblique des forces tout au long de la paroi jusqu'au fond, une idée déjà évoquée auparavant ("à moins que les billes qui sont sur le côté poussent aussi" 13A):

- 41A : on retrouve la forme du $c _ \backslash$ dans le $a \backslash _ /$ mais ici on a des billes d'eau en plus sur les côtés.
43A : Le tout c'est de savoir si ça change ou si ça ne bouge pas.
47A : Ici en ligne cela ne change pas. La pression elle est constante en ligne [horizontale]. La pression change avec ... enfin ...
49A : C'est juste voir si ces billes-ci sur les côtés changent la pression sur la surface.
53A : C'est ça que... c'est difficile à savoir.

A ce moment il y a une intervention du professeur, très directive, qui bloque le développement autonome du raisonnement des étudiants, en provoquant un changement radical. Il propose de "regarder localement ce qui se passe", "au niveau de la paroi, dans les deux configurations" *a* et *b*, "regarder juste à l'angle, représenter trois balles de mousse et faire un bilan des forces". Le débat continue avec un dialogue serré entre les étudiants et le professeur, qui les guide avec une série de suggestions reprenant le modèle et la séquence, auxquelles les étudiants réagissent positivement :

- 60P: Qu'est ce qu'il faudrait montrer dans ce cas là?
61A : Euh! montrer que cela n'a pas d'interaction. Enfin si, mais que la résultante est nulle. Et que cela ne va pas changer la pression exercée par cette colonne d'eau là.
62P : Ici, [cas $_ \backslash$] la différence avec le cadre *a*, le problème c'est l'absence de balle au-dessus, dans ce cas-là. Il faut montrer que cette absence ne change strictement rien au cas droit où, effectivement, j'ai deux balles sur chaque... et là c'est assez clair, donc il faut que/
63A : Ah! En fait la paroi ici exerce la même pression que celle-là exerce sur celle-là.
69A : ... ici la pression va être exercée par la masse de celle-ci plus la paroi et donc la pression de la paroi devra être égale à la pression exercée par une petite bille

- 72P : Ben tu fais un bilan de forces, tu dessines les forces qui s'exercent sur celle-là
 74P : Et mets bien en évidence ce qui dans le modèle permet d'avoir, permet que la paroi transmette... enfin si tu veux ce qu'il faut montrer c'est qu'effectivement la force qui pousse la paroi/
 75A : C'est exactement la même que la force exercée par une petite colonne d'eau
 76P : Voilà

Il apparaît l'idée de la paroi exerçant une force sur le liquide (63), qui compense le manque de "billes" au-dessus (75). L'idée de *propagation* des forces dans toutes les directions est évoquée aussi (88), mais il reste encore des doutes concernant le cas $c / _ \backslash$:

- 86A : Le poids mais le poids il agit là verticalement, il n'agit pas sur celle-ci
 87P : Si, on vient d'expliquer la chose
 88A : Il se... en fait, il se propage aussi
 90A : eh, j'ai des problèmes avec ces trucs, moi.

C'est encore le professeur qui suggère de considérer la force exercée par la paroi et sa composante verticale :

- 105P : La force de contact paroi-balle, pourquoi, parce qu'elle est en oblique et donc il y a une composante verticale
 106A : Ah! perpendiculaire qui est égale au poids des balles
 113P : Tu peux faire ça ... dans le cas convexe, tu peux le faire oui voilà avec un angle obtus.
 114A : Oui donc finalement c'est ce que ...
 115P : Et donc ... le cas avec un angle obtus, dans quel sens est dirigée la force?
 116A : Comme cela.

Le dénouement final semble ici provoqué par l'intervention très directive du professeur, mais les étudiants semblent bien adhérer à la logique proposée par la séquence, même si c'est plutôt après sollicitation.

Conclusion

La règle "égale hauteur=égale pression", d'emblée évoquée, semble conduire tout de suite à la réponse exacte. Mais les étudiants n'arrivent pas à se faire une idée du *comment peut-il arriver* que la pression soit effectivement égale. En raisonnant sur la figure, les doutes augmentent. La conception du "fluide sur la tête" crée des fortes difficultés, surtout pour le cas $c / _ \backslash$, et les déstabilise, à tel point que l'autre source typique d'erreur, "*plus de liquide = plus de force sur le fond*" fait aussi son apparition.

A moitié de leur parcours de raisonnement, c'est la suggestion du professeur de "regarder *localement* ce qui se passe, au niveau de la paroi", qui déclenche un début de solution. Une solution qui ne sera accomplie qu'assez longtemps après, après l'activation de quelques idées clés : la *propagation* des forces dans toutes les directions, le rôle de la paroi, exerçant une force sur le liquide qui peut compenser le manque de "billes" au-dessus, l'existence d'une composante verticale de la force exercée par la paroi.

L'utilisation du modèle est fréquente et décisive, les étudiants montrent qu'ils adhèrent bien à la logique proposée par la séquence, même si la solution du problème se met en place plutôt après sollicitation de la part du professeur.

CHAPITRE 9. CONCLUSIONS

9.1 Les raisonnements des apprenants

La recherche sur les raisonnements des apprenants, décrite aux chapitres 4 et 5, permet de dresser un tableau des conceptions concernant les fluides en situation statique en présence de la gravité et de certaines tendances ou habitudes diffuses dans l'analyse de ces situations.

Avant tout, les résultats montrent que les questionnements proposés, apparemment élémentaires ou considérés comme tels a priori, aux niveaux envisagés (lycée et début université), n'avaient rien de banal pour beaucoup d'étudiants. Certaines questions apparaissent plus que d'autres comme une source de difficulté et de confusion.

Les règles ou les formules apprises ne semblent pas être concluantes pour les étudiants. Lorsqu'elles sont évoquées ($p=F/S$, $\Delta p=-\rho g \Delta h$ ou similaires), elles sont souvent interprétées de façon incorrecte ou elles sont rapidement mises de côté parce qu'une autre conception plus forte prend le dessus et une autre typologie d'explication est ressentie comme nécessaire.

Par exemple, la définition $p=F/S$ peut conduire à la réponse que la pression est plus grande dans une grotte ou dans une pièce qu'à l'extérieur, car "*dans la grotte, l'aire de la surface est plus petite et donc la pression est plus grande*". Le même raisonnement est fait pour la chambre et montre que la formule a été lue comme une relation de proportionnalité inverse entre pression et aire de la surface, dans un raisonnement à une seule variable et sans que les élèves voient clairement quelle est la force impliquée dans la formule.

Dans la loi de l'hydrostatique, exprimée en forme mathématique ($p=p_0+\rho gh$ par exemple) ou verbale ("la pression dépend de la profondeur", "elle est égale au poids d'une colonne..." etc.), la grandeur h , hauteur ou profondeur est souvent interprétée comme la hauteur du fluide directement au-dessus du point considéré, ce qui mène à la conclusion que dans une grotte la pression est plus petite ou qu'il y a une pression différente en deux points au fond d'un récipient de forme irrégulière.

Dans d'autres cas, cette loi est bien considérée dans la forme "à égale altitude, la pression sera la même", mais cela ne semble pas convaincre ou satisfaire le besoin d'explication de l'étudiant, car c'est en contradiction avec ses typologies de raisonnement personnelles, plus enracinées.

L'incertitude dans laquelle cette situation peut plonger un étudiant est bien exprimée par la justification suivante:

« Il est vrai qu'ils [les poissons] sont à la même profondeur, dès lors ils devraient supporter la même pression. Cependant, l'eau qui se trouve au-dessus du poisson dans la mer est une masse plus importante que la masse d'eau qui se trouve au-dessus du poisson dans la grotte. Dans la mer, le poisson supporte donc une plus grosse pression que l'autre poisson. »

Et aussi dans un des débats, on peut entendre :

« Normalement, toutes les particules qui sont à la même hauteur sont censées être à la même pression. Non, parce qu'on sait bien... Oui, c'est à la même hauteur, si c'est à la même hauteur au-dessus, mais ici t'as une différence, t'as plus de poids, tu vois... t'as un poids plus grand, comme t'as un peu plus de poids, ben, ça appuie plus, forcément. »

Mis à part l'usage des formules et des règles, deux catégories de conceptions émergent de notre enquête comme explicatives de presque toutes les justifications données par les sujets interrogés. Chacune de ces catégories peut être subdivisée à son tour en deux typologies.

Avant tout, une dichotomie apparaît entre deux façons bien différentes de regarder le fluide, une dichotomie qu'on retrouve dans les textes et dans les programmes d'enseignement, surtout pour les gaz.

D'un côté, il y a la pression du fluide vue comme "tassement" de particules ou de matière, avec l'addition, pour les niveaux scolaires plus élevés, de la cinétique des chocs. C'est le cas de situations, typiques dans l'enseignement, comme celle d'un gaz dans un cylindre avec un piston ou une seringue. Dans ces problèmes, le haut et le bas n'existent pas, on y parle bien souvent de "la pression du gaz", en supposant qu'elle est la même dans tous les points du gaz. La gravité est expulsée de ces descriptions, car non significative pour les problèmes en considération, ce qui est bien légitime et courant en physique.

De l'autre côté, il y a les situations "en présence de gravité", dans lesquelles toute la structure explicative bascule vers la considération de l'équilibre entre les forces de pression et le poids du fluide. L'image de particules plus ou moins tassées est oubliée en faveur de celle de quelque chose qui pousse vers le bas et qui doit être soutenu par ce qui est au-dessous, pour qu'il y ait équilibre. C'est le cas de l'atmosphère et de la variation de sa pression avec l'altitude, un fait bien connu, que l'enseignement se charge justement d'expliquer scientifiquement, comme le demandent aussi les programmes scolaires parus en France. C'est aussi le cas de l'eau dans une piscine, dans un lac, dans la mer ou simplement dans un récipient ou dans un tube en U.

La connexion entre les deux types de situations et d'explications est très rarement abordée aux niveaux scolaires ici envisagés. Une confusion peut apparaître chez les apprenants n'ayant pas bien compris le sens et le statut de cette double approche et qui donc s'autorisent à les utiliser à leur gré partout.

Les liquides semblent pâtir le plus de cette déconnexion. Ballottés entre une assimilation aux gaz et une similitude avec les solides, ils ne semblent pas avoir un statut net dans les représentations des élèves. Les liquides ne semblent pas pousser partout, s'évader en toute direction, comme les gaz, ils restent dans le récipient ouvert et, s'ils bougent spontanément, ils le font toujours pour tomber vers le bas. D'ailleurs, dès l'école primaire, on apprend que les rivières coulent vers la mer, qui est toujours en bas. Et que les liquides sont "incompressibles", au contraire des gaz. Mais ils ne sont même pas comme des solides, car ils ne "tiennent" pas tout seuls, sans parois latérales. Un glaçon demeure stable, appuyé sur une table horizontale, alors que l'eau coulerait partout, vers le bas.

Revenons maintenant aux conceptions retrouvées dans notre recherche.

La première des conceptions annoncées plus haut est qu'un fluide confiné dans un endroit plus petit aura une plus grande pression, en bref : "espace plus petit, donc pression plus grande". Cet espace plus petit peut être la grotte du questionnaire "Poissons", la pièce du questionnaire "Chambre", ou un angle ou un recoin entre deux parois proches d'un récipient du questionnaire "Récipients".


Cette catégorie rejoint deux types de raisonnements : l'une fait appel au fait que le fluide, dans moins d'espace, est plus "tassé" (*« Dans la grotte l'eau est plus concentrée dans un endroit, plus compacte. »*, *« Dans le récipient plus étroit l'eau est plus comprimée. »*), l'autre au fait que les parois solides qui l'entourent poussent et "compriment" le fluide (*« Les murs de la salle compriment l'air. »* ; dans le coin du récipient *« l'eau est entourée de trois parois, sera plus comprimée. »*).

Cette catégorie est plus présente pour l'air que pour l'eau, elle est plus fréquente aux niveaux scolaires les plus bas et tend à diminuer d'importance avec l'âge jusqu'à devenir nettement minoritaire au début de l'université. Elle est aussi moins fréquente chez les groupes d'élèves de secondaire en filières scientifiques, que chez les élèves des filières non scientifiques, de même classe et du même établissement. Cette conception semble donc être un symptôme d'un raisonnement physique assez élémentaire et peu évolué.

La seconde catégorie d'explication et de représentation des fluides est celle focalisée sur le rôle du poids.

En effet, la présence de la gravité, du poids, avec sa prégnance de mémoire et d'expérience directe et quotidienne, est un élément qui change le "regard" de l'élève et le déstabilise, en occultant beaucoup de notions apprises dans l'étude de la physique, à la faveur d'une "intuition" souvent anthropomorphique. Le "tout poids" est un réflexe de raisonnement très répandu et tenace, qu'on retrouve encore fortement chez les étudiants de première année universitaire, même après enseignement. Le poids "agit" vers le bas, donc ce qui détermine la pression ou la force sur une surface horizontale est le poids de ce qui est au-dessus.

Deux variantes se manifestent dans cette catégorie, celle "tout poids" ou "plus d'eau, donc plus de force sur le fond" et celle du "poids sur la tête".

La première met en œuvre un raisonnement global ; le fluide est pris en considération dans sa totalité. La pression dépend alors, selon cette conception, du poids ou de la quantité de fluide au-dessus, et la force exercée par le fluide aussi. Se rejoignent ici la non-différentiation entre pression et force d'un côté, la "solidification" du fluide, dont tout le poids doit être "soutenu" par ce qui est en bas, de l'autre côté. Sur cette base, on peut conclure que la pression est plus grande en pleine mer ou en plein air que dans un espace confiné, à même altitude, et que la force exercée par le liquide sur le fond d'un récipient est plus grande dans le récipient contenant plus de liquide, c'est-à-dire celui de forme évasée .

D'ailleurs, le *paradoxe hydrostatique* (cf. par. 3.2) est considéré comme un paradoxe parce qu'on pense que le liquide devrait "transmettre" son poids sur les objets situés au-dessous et donc on s'émerveille qu'un liquide puisse exercer une force supérieure à son poids ou que deux quantités de liquide, ayant différents poids, puissent exercer la même force.

Aucune analyse plus détaillée et localisée ne semble se produire dans ce type de raisonnement, le "regard" de l'élève étant "global" : plus de liquide, donc plus de force et souvent, aussi, plus de pression. Un raisonnement apparemment assez primitif, mais qui s'avère très résistant et se propage jusqu'aux étudiants en début d'université, même après un cours théorique classique sur la statique des fluides.

La seconde conception révèle déjà une analyse plus fine, intermédiaire entre le raisonnement totalement global précédent et celui, local, où sont considérées les interactions entre les parties du fluide. En effet, elle met en relation le point du fluide en étude avec le fluide qui est *directement* au-dessus du point considéré ; c'est la conception selon laquelle la pression dépend du poids de la colonne de fluide directement au-dessus du point considéré. En bref: "colonne d'eau au-dessus" ou "fluide sur la tête" suivant l'efficace expression d'un élève.




La surface en bas doit "soutenir" exactement le fluide qu'il y a au-dessus, comme des boîtes sur lesquelles s'appuient d'autres boîtes. Cette analogie pourrait aussi être productive si elle ne limitait toute idée d'action à la direction verticale, avec exclusion d'une quelconque considération d'éventuelles interactions horizontales. Si tout se passe seulement à la verticale et vers le bas, comme dans le cas de la gravité, il est facile de tomber dans les pièges typiques associés aux comportements, même les plus simples, des fluides. Cette "solidification" du

fluide en colonne empêche de comprendre que l'équilibre d'un liquide dans un récipient demande des conditions différentes, surtout en ce qui concerne le rôle des parois. En négligeant de prendre en compte les interactions horizontales, plusieurs étudiants peuvent ainsi conclure que la pression dans une grotte sous-marine sera plus petite qu'en pleine mer, même si les points considérés sont à égale altitude.

"Malgré que ces poissons se trouvent à la même hauteur, le poids de la colonne d'eau n'est pas le même, donc la pression n'est pas la même."

Les formulations de la loi de l'hydrostatique en termes de "poids d'une colonne de fluide...", parfois utilisées dans les textes ou par les enseignants, peuvent favoriser ces malentendus.

Ce raisonnement du "fluide sur la tête", très utilisé dans la situation des "Poissons", est le plus présent et le plus actif dans les débats des étudiants, et il fonctionne aussi avec le modèle des balles de mousse, alors évoqué en termes de "colonnes de boules ou de billes" au-dessus. Il peut être considéré comme un raisonnement mixte local global et il constitue souvent une première avancée vers un raisonnement systémique complet.

Dans la situation des trois récipients, il conduit rapidement à l'égalité des forces pour le récipient évasé  et celui à parois verticales , mais laisse beaucoup de difficultés sur le cas du récipient à parois surplombantes , à cause des différentes hauteurs des "colonnes d'eau" au-dessus de différents points du fond.

On voit ici qu'il est bien difficile pour les étudiants d'utiliser une description en termes de pression pour donner une évaluation des forces ; les différentes idées mises en œuvre s'embrouillent et les résultats sont souvent incorrects ou contradictoires.

Dans la situation des "Poissons" et de la "Chambre", même les étudiants qui répondent correctement que la pression est égale à l'intérieur et à l'extérieur de la grotte ou de la pièce se limitent souvent à évoquer la règle "même hauteur, donc même pression". Ils ne formulent presque jamais des arguments qui puissent réconcilier cette règle avec les interactions entre les parties du fluide et avec le rocher, en particulier l'interaction entre le rocher et l'eau au plafond de la grotte, là où l'eau est plus compressée que celle qui est à la surface libre.

D'ailleurs, quelques étudiants (une minorité, en tout cas) mènent jusqu'aux ultimes conséquences cette conception, en arguant que le rocher en haut de la grotte n'exerce aucune force sur l'eau, car il n'a pas besoin de s'appuyer sur l'eau, *"Le rocher ne repose pas, ne pousse pas sur l'eau : si l'eau sèche, le rocher ne tombe pas"*. Ici, non seulement tout se passe en direction verticale, mais aussi exclusivement vers le bas. Si le rocher tient tout seul, inutile que l'eau fasse des efforts pour le soutenir, donc : pas de force.

On peut bien supposer que s'il manque l'idée d'un *mécanisme*, à partir des actions locales, les étudiants n'arrivent pas à bien comprendre la situation physique.

Cette observation nous amène à considérer d'autres caractéristiques plus générales des raisonnements estudiantins, apparus dans notre recherche et qui nous semblent importants pour comprendre la structure de raisonnement et les difficultés des étudiants.

La première est justement le manque de connexion entre les actions locales et des effets globaux, entre ce qui se passe dans les différents endroits du fluide et le résultat global. La difficulté à mettre en œuvre cette connexion semble être le principal point critique pour la compréhension de la situation physique en étude ; sa résolution constitue en effet le but central de la séquence d'enseignement proposée.

Cette connexion demande un raisonnement systémique, plus articulé et complexe que les précédents, mais qui seul peut enfin satisfaire l'exigence d'une explication dynamique, en termes de forces et en termes d'interactions locales qui se propagent, capable de rendre

compte du mécanisme qui permet d'établir la situation finale d'équilibre, en surmontant les apparentes contradictions entre certaines lois formelles et le comportement local du fluide.

Un exemple éclatant en ce sens est celui de la poussée d'Archimède.

Le questionnaire sur le ballon immergé dans l'eau a montré que, même si les étudiants semblent être informés de l'augmentation de la pression avec la profondeur, ils ne sont pas si sûrs à propos des forces "de pression" exercées par l'eau sur le ballon. Seulement 42% des étudiants interrogés donnent une réponse correcte à la question concernant l'intensité des forces pressantes agissant en haut, en bas et sur les côtés d'un ballon immergé dans l'eau, 18% répondent qu'il y a quatre forces égales et d'autres (15%) pensent qu'il n'y a pas de forces sur les côtés. Au total, seulement 60% des étudiants considèrent qu'il y a une force en bas et en haut, et que celle en bas est plus grande. Il y a donc 40% qui se trompent sur ce point essentiel. Dans le cas du ballon dans l'air, les réponses correctes sont encore moins nombreuses (29%).

Par ailleurs, interrogés explicitement sur l'éventuelle relation entre ces forces "de pression" du fluide et la poussée d'Archimède, la grande majorité des étudiants estiment qu'il y a une déconnexion nette entre les deux choses.

« Non, la poussée d'Archimède pousse seulement du bas vers le haut, elle n'a rien à voir avec la pression qu'exerce un liquide autour d'un objet. »

Seulement 11% lient de façon assez claire la poussée d'Archimède aux forces de pression ; d'autres (21%) répondent "oui" à la question, mais ne donnent pas de justification ou se limitent à une phrase générique, donc leur conception sur cet aspect reste incertaine.

En tout cas, au moins 64% d'étudiants montrent que, pour eux, la poussée d'Archimède n'est pas la résultante des forces de pression : ils déclarent, soit qu'elle n'a rien à voir avec ces forces (28%) ou qu'elle concerne uniquement la force en bas du ballon (27%), soit qu'il n'y a pas de forces de pression au-dessous ou au-dessus du ballon, ou que les forces de pression sont d'intensité égale partout sur le ballon (9%). Certains étudiants (12%) écrivent clairement que la poussée d'Archimède est une autre force, agissant seulement en bas du ballon et qui s'ajoute aux forces de pression.

« La force exercée sur le point B est égale à la poussée d'Archimède. »

« La force exercée sur B (en bas du ballon) est égale à la somme de la pression de l'eau et de la poussée d'Archimède. »

Ces résultats montrent nettement que la nature et l'origine de la poussée d'Archimède ne sont pas comprises par la grande majorité des étudiants. Ils connaissent la règle du "poids du fluide déplacé", mais ne font pas une connexion raisonnée entre cette description globale et formelle et une description locale, en termes de forces de pression que le liquide exerce sur chaque petite partie de la surface du ballon. Cette fameuse règle ou loi globale peut être aussi un obstacle à la compréhension. En effet, plusieurs étudiants soulignent la nature "globale" de la poussée d'Archimède, considérée comme une force de volume, agissant sur tout le ballon, appliquée au centre du ballon et dirigée vers le haut, en contraste avec les forces de pression, qui sont des forces de contact, "locales", agissant sur chaque petite partie du ballon et dirigées aussi vers le bas : contraste si radical que la connexion entre les deux phénomènes devient difficile à saisir.

« Non, ces forces sont dues à la pression de l'eau, qui est due à la profondeur, la poussée d'Archimède est due au volume du ballon et à la différence de densité entre l'eau et l'air du ballon. »

La ténacité de cette difficulté est confirmée par les réponses au même questionnaire d'un groupe d'enseignants en formation : près de la moitié de ces enseignants, qui montrent dans

les autres questions une bonne maîtrise de la statique des fluides, n'arrivent pas à établir une connexion convaincante entre la poussée d'Archimède et les forces de pression de l'eau.

Ces résultats, outre une étonnante et persistante déconnexion entre les descriptions locale et globale, montrent aussi que la plupart des étudiants ne se posent pas le problème de la nature, de l'origine de la poussée d'Archimède. Elle semble être, pour eux, une force spéciale, probablement exercée par l'eau, mais dont l'origine n'a pas besoin de justifications ultérieures (au contraire, c'est elle qui peut expliquer d'autres phénomènes et forces) – une sorte de force fondamentale, liée au poids, mais dont l'explication demeure plutôt mythique que rationnelle.

Indiquons deux autres aspects des raisonnements des étudiants que notre recherche a mis en évidence.

L'un concerne la relation entre la gravité et la pression dans les fluides. Les réponses au questionnaire "Interactions" montrent que, probablement à cause de l'insistance sur le rôle du poids, un glissement de sens s'est produit, chez les enseignants et les étudiants interrogés, dans les affirmations évoquant la relation entre la gravité et la pression ou sa variation avec la profondeur. Cette relation entre deux phénomènes et deux types distincts d'interaction se transforme en une identification.

Il s'agit ici de la confusion, souvent faite dans le raisonnement commun, entre la *cause efficiente* et la *cause contingente*, entre les *conditions* de production du phénomène et la cause qui le produit (Halbwachs 1971), entre provoquer et produire le phénomène.

En effet, la force de gravité, le poids, provoquent l'augmentation des forces de pression, mais ce sont les interactions entre les parties du fluide qui sont en relation directe avec la pression et ce sont les interactions entre les parties du fluide et les parois solides qui "produisent" les forces de pression, ces dernières n'étant que les résultantes au niveau macroscopique de ces interactions. Presque tous les étudiants et les enseignants interrogés répondent que la force pressante du liquide est une force gravitationnelle. Ce résultat très net confirme que l'insistance presque exclusive, habituelle dans les cours et dans les textes, sur le rôle du poids du fluide comme *cause* de la pression hydrostatique peut engendrer l'idée que la force pressante des liquides est non seulement due au poids, est égale au poids, mais qu'elle est le poids, et donc une force de nature gravitationnelle.

«La force est due au poids de la colonne d'eau située au-dessus »,

« La force exercée est le poids ».

L'autre aspect mis en évidence consiste en un déplacement ou une délocalisation de la force, phénomène apparu dans les réponses au questionnaire "Récipients".

Plusieurs justifications à ce questionnaire expriment l'idée que l'air, situé au-dessus de la surface libre d'un liquide dans un récipient, peut agir directement sur le fond du récipient, et donc qu'il y a deux forces distinctes agissant sur le fond du récipient, l'une exercée par l'eau et l'autre exercée par l'air au-dessus du liquide.

Si la pression atmosphérique diminue, «La pression exercée par l'eau même sur le fond [du récipient] est identique, mais la pression atmosphérique s'ajoute ...»

« la pression atmosphérique exerce une force sur le récipient. Si cette force varie, l'eau pousse moins fort sur le fond du récipient. Mais la force "effective" de l'eau ne change pas »

Dans le raisonnement de ces étudiants, la formule $p = p_{\text{air}} + \rho gh$ se transforme en une addition entre deux forces distinctes, exercées par deux corps différents, dont on trouve la résultante : $p_{\text{tot}} = p_{\text{air}} + p_{\text{eau}}$ et donc $F_{\text{tot}} = F_{\text{air}} + F_{\text{eau}}$.

On voit ici le glissement de sens de la formule. Les termes algébriques à droite de l'équation sont *matérialisés*, et l'agent des forces de pression est en partie déplacé : ce n'est plus seulement l'eau en bas qui exerce une force de contact sur le fond du récipient, l'air au-dessus de l'eau est censé aussi exercer une force sur le fond même. C'est encore, il nous semble, un effet de l'absence d'un raisonnement local. Le besoin d'une explication causale, alors qu'ils ne disposent que de l'outil, formel et global, qu'est la loi de l'hydrostatique, pousse les étudiants à chercher la cause dans les termes de cette même formule ; mais ils ne peuvent y trouver qu'une explication verbale, qui occulte les forces réellement impliquées : des forces de surface, agissant localement.

Finalement, en ce qui concerne le problème de la compressibilité des fluides, le questionnaire "Seringue" montre que 37% des étudiants envisagent un changement de volume du liquide, soumis à une force exercée par le piston, un changement déclaré petit ou sans spécification.

Compte tenu de l'insistance des textes scolaires et des enseignants sur la présumée « incompressibilité des liquides », ce pourcentage d'étudiants qui envisagent une variation de volume est assez surprenant. Cela pourrait signifier qu'en réalité, la conception spontanée qui prévaut est que les liquides sont compressibles, que leur volume peut changer, au moins un peu, suivant peut-être l'idée primitive que "si on pousse, ça s'écrase", tandis que c'est l'influence scolaire qui fait pénétrer l'idée de l'incompressibilité des liquides.

Cette interprétation nous a poussés à essayer d'utiliser cette idée comme une "conception d'ancrage" dans la construction de notre séquence, qui puisse aider les étudiants à surmonter les limites de leurs raisonnements, décrits plus haut, en favorisant la prise en compte des changements locaux dans le liquide et de leur transmission de proche en proche, pour bâtir une connexion entre les descriptions globale et locale, connexion qui est souvent absente et que nous jugeons déterminante.

L'affirmation, souvent répétée comme une définition ou un axiome, que "les liquides sont incompressibles" est parfois interprétée comme signifiant que même la pression ne peut pas changer, comme d'ailleurs semble l'indiquer le mot « incompressible » :

«La pression reste inchangée, car l'eau est un liquide incompressible. Le volume reste inchangé, car l'eau est un liquide incompressible.»

D'ailleurs, des enseignants en formation, interrogés sur cette question de la seringue, ne semblent pas toujours convaincus de cette affirmation, et ont des idées conflictuelles sur ce qui se passe réellement dans un liquide :

«L'eau est, par définition, un volume incompressible, donc le volume varie très peu, on dira qu'il reste inchangé. »

«Le volume reste constant, d'après l'incompressibilité de l'eau (modèle idéal). Mais en pratique, l'eau est un peu compressible, donc le volume diminue très faiblement.»

9.2 La séquence.

Il est toujours difficile d'établir avec exactitude les aspects d'une séquence d'enseignement qui ont été efficaces pour promouvoir l'apprentissage de l'étudiant. Plusieurs facteurs interviennent dans la réalisation du projet, de sorte qu'il est problématique de les séparer et de les prendre en considération individuellement.

De plus, il arrive que les conclusions positives des expérimentations, rapportées dans la littérature didactique, puissent aussi faire l'objet d'une critique, en arguant que l'enseignant, quelquefois étant lui-même un des concepteurs de la séquence, était plus motivé, plus enthousiaste que d'habitude et il avait plus d'indications didactiques spécifiques ; en conséquence, il n'y aurait rien de surprenant à observer quelque avantage chez les élèves "expérimentaux"⁶.

Il est donc recommandable d'être très prudent dans les conclusions à cet égard, mais nous pensons qu'il est quand même possible de retenir certains résultats sur des effets limités et spécifiques, avec des conditions définies aussi précisément que possible.

Cette conclusion est appuyée par des différences entre résultats, qu'on peut difficilement attribuer à la motivation de l'enseignant. Lorsqu'on constate un succès sur un aspect ou sur une question, et un insuccès sur un autre, on peut légitimement penser que le résultat positif n'est pas seulement un effet de contour ou un effet affectif (engagement des enseignants, plus d'attention des étudiants). C'est justement ce qui est arrivé dans notre expérimentation.

L'évaluation de la séquence s'appuie sur deux types de résultats.

L'un est exprimé en termes de comparaison de pourcentages de réponses avec un groupe témoin ayant suivi un cours "classique", l'autre provient de l'observation et de l'analyse de l'évolution des raisonnements des étudiants, lors du déroulement des débats. Ceci permet d'étudier comment les éléments offerts avec la séquence se connectent et s'articulent avec les conceptions préexistantes des étudiants, et d'évaluer comment et en quelle mesure ces éléments ont contribué à l'enrichissement des ressources conceptuelles des étudiants.

Il nous semble que ce second volet de l'évaluation, même s'il est moins facilement quantifiable que les résultats des questionnaires, une fois analysé en profondeur, constitue une démonstration très convaincante du fait que les éléments caractéristiques de la séquence ont activé, chez les étudiants observés, des changements notables dans leurs raisonnements, dans la direction souhaitée.

À travers ces éléments d'évaluation (voir chap. 7 et 8), nous attendons évidemment un éclairage a posteriori des prémisses qui sont à la base de la construction de notre séquence. Celles-ci motivent le choix des éléments suivants, considérés comme facteurs positifs efficaces pour l'apprentissage visé.

⁶ Par exemple, Rainson et Viennot (Rainson 1995, Rainson et Viennot 1998) ont montré que la motivation et l'engagement de l'enseignant n'étaient pas suffisants pour provoquer des changements au niveau cognitif, changements qui, en revanche, étaient observés avec une version plus étudiée de la séquence, l'enseignant restant le même. En ce qui concerne notre expérimentation, la première année, les séances expérimentales ont été dirigées par un professeur impliqué dans la phase de conception. Par contre, la seconde année, une partie des étudiants a reçu la séquence par ce même professeur, les autres (près de la moitié) l'ont reçue par deux enseignants nullement impliqués dans la recherche. Les résultats ont été meilleurs dans cette seconde année et ils ne font pas apparaître des bénéfices au profit de l'enseignant impliqué dans la conception de la séquence.

- 1) L'utilisation d'un modèle mésoscopique simple, visuellement accessible, faisant appel aux expériences quotidiennes des étudiants.
- 2) L'attention portée sur les interactions locales, en termes de forces de contact.
- 3) Une analyse des interactions dans le fluide, considérant non seulement les forces vers le bas, mais surtout en direction horizontale et en direction verticale vers le haut.
- 4) La proposition d'une connexion entre une description globale et une analyse locale, via la transmission des interactions et des changements dans le fluide.
- 5) L'activation de certaines "conceptions d'ancrages" ou tendances communes de raisonnement, comme levier pour provoquer un changement conceptuel efficace, à savoir :
 - l'idée que "si on pousse, ça s'écrase" et que les liquides sont compressibles, quoique très peu ;
 - la conception du "poids sur la tête", selon laquelle le fluide au-dessus pousse et écrase celui au-dessous ;
 - le raisonnement causal, comme base explicative préférée par les étudiants, utilisée à côté et en complément des lois formelles.

Les justifications données avec les réponses aux questionnaires montrent que les étudiants du groupe expérimental, après enseignement, considèrent beaucoup plus souvent que ceux du groupe de contrôle les actions en direction horizontale et en direction verticale vers le haut, en raisonnant en termes de transmission des interactions de proche en proche :

«La pression est égale ... si on considère le modèle des billes de mousse, celle à l'extrême gauche subit des forces, qui se répètent de boule en boule jusqu'à celles de la grotte»

Ce type de raisonnement émerge, explicite, dans les débats :

«Là tu vois si tu pousses plus fort, tu vas pousser plus fort sur celle-là, celle-là poussera plus fort sur la deuxième bille, la deuxième bille poussera plus fort sur la troisième, et puis en réaction le mur va pousser sur la dernière bille et ça va de nouveau tout retourner dans ta main.»

«Je veux dire quand tu prends une boule ou une molécule isolée, elle va subir et ou exercer une force égale dans les quatre directions, c'est ça qu'on avait vu aussi ... n'importe où, dans les trois directions donc ce qu'on a ici c'est, c'est que ces billes-là, elles subissent une pression comme ça, donc elles vont exercer une pression sur la paroi ...»

Dans le questionnaire "Poissons", les étudiants évoquent aussi la force exercée par le plafond de la grotte sur l'eau pour justifier que la pression est égale pour les deux poissons, même s'ils n'ont pas la même hauteur d'eau au-dessus d'eux :

«La pression est égale, car la différence de hauteur est compensée par la force qu'exerce la paroi». «La force exercée par la paroi supérieure de la grotte sur l'eau est égale à la force qui serait exercée s'il y avait eu de l'eau au-dessus à la place de la roche».

Ces commentaires suggèrent qu'une avancée notable s'est produite, sur la base du modèle, chez certains étudiants. En effet, cet aspect nous semble crucial pour atteindre une compréhension du mécanisme d'adaptation mutuelle entre les états des diverses parties du fluide, et concilier la formule de l'hydrostatique avec une analyse des interactions locales.

Les points à la base de la conception de la séquence, évoqués plus haut, sont tous actifs dans les raisonnements produits par les étudiants ayant suivi la séquence et se révèlent souvent déterminants pour une réponse correcte et surtout pour la résolution des difficultés manifestées lors des débats. L'idée de la (petite) compressibilité du liquide est peu utilisée

dans les justifications, mais elle est évoquée explicitement dans les débats («*Parce que tu vois, là, ça s'écrase, c'est compressé, la boule est compressée*» débat n°5) et devient déterminante dans un débat (n°6) :

«Parce que les boules ayant un certain poids, elles ont tendance à s'écraser donc à exercer une force latérale...horizontale sur les boules avoisinantes, cette force, elle se transmet jusqu'aux parois et la paroi étant inclinée induit une force ... vers le bas. »

Décrivons maintenant un peu plus en détail les différents éléments d'évaluation obtenus.

Les résultats des questionnaires

Rappelons que le post-test utilisé comprenait les questionnaires "Poissons" (question 1 sur la comparaison de la pression dans une grotte sous-marine et en pleine mer, questions 2 et 3 sur l'existence de forces entre le rocher et l'eau dans la grotte), "Seringue avec de l'eau" (éventuelles variations de pression et de volume de l'eau à la suite d'une poussée sur le piston), "Ballon dans l'eau" (question 1 sur les forces exercées par l'eau sur le ballon, en haut, en bas et sur les côtés ; question 2 sur l'éventuelle relation entre ces forces et la poussée d'Archimède).

La comparaison statistique entre le groupe expérimental et le groupe témoin a été faite en utilisant le test du χ^2 .

En 1999, nous avons trouvé un avantage, petit en valeurs absolues mais statistiquement significatif, en faveur du groupe expérimental, dans les réponses concernant les forces exercées par le rocher sur l'eau du questionnaire "Poissons".

Dans le questionnaire "Seringue", il y a, chez le groupe expérimental, une plus fréquente considération des variations de volume de l'eau, surtout des variations définies comme "petites" ou "très petites", la différence avec le groupe de contrôle étant statistiquement significative.

Sur les autres questions posées, nous trouvons souvent des résultats meilleurs dans le groupe expérimental, mais aucune de ces différences n'est statistiquement significative (au test du χ^2).

En 2000, nous avons trouvé encore un avantage significatif, en faveur du groupe expérimental, dans les réponses concernant les forces exercées par le rocher sur l'eau du questionnaire "Poissons".

De plus, par rapport à l'année précédente, nous observons :

- Un avantage du groupe expérimental, pas très grand en valeur absolue (81% de réponses correctes contre 70%), mais statistiquement significatif ($p=4,4\%$), sur la question 1 du questionnaire "Poissons". Cet avantage demeure significatif aussi en cumulant les résultats des deux années ($p=1,4\%$).
- Une différence forte, statistiquement très significative ($p<0,1\%$), en faveur du groupe expérimental, pour la question 1 du questionnaire "Ballon dans l'eau". Cet avantage du groupe expérimental demeure significatif aussi en cumulant les résultats des deux années ($p<0,1\%$).

Sur la question 2 du questionnaire "Ballon dans l'eau", concernant la poussée d'Archimède, il y a petit un avantage en faveur du groupe expérimental, mais la différence n'est pas significative, ni en 1999, ni en 2000, ni pour les résultats cumulés des deux années.

Ces données, ici résumées, montrent que :

- Il y a eu un avantage, pas éclatant mais bien sensible, du groupe expérimental, un avantage que les tests statistiques autorisent à ne pas attribuer au hasard.
- Cet avantage est beaucoup plus net et plus large dans l'expérimentation de l'an 2000 que dans celle de 1999.
- Les différences en faveur du groupe expérimental ne s'étendent pas de la même manière à toutes les questions posées ; en particulier, elles ne sont pas significatives pour la question sur la poussée d'Archimède.

Les meilleurs résultats de l'an 2000 peuvent être interprétés comme un effet des changements introduits dans le déroulement de la séquence cette année-là. Rappelons qu'une séance finale de travaux dirigés, comportant des débats entre étudiants, a été ajoutée cette deuxième année. On peut supposer que cette occasion de mettre en œuvre les acquis de la séquence sur un exercice spécifique, avec un débat entre pairs et l'aide du professeur, a favorisé une réflexion plus profonde sur le sujet et une assimilation plus convaincue et plus opérationnelle du modèle proposé dans la séquence.

Le succès du groupe expérimental, modéré sur certains points, très net sur d'autres, peut être considéré comme un effet des acquis liés à la séquence. En effet, les améliorations constatées correspondent bien aux objectifs de la séquence et aux moyens cognitifs offerts, à savoir l'attention accordée aux interactions locales, à la réciprocité des forces, à une analyse des interactions en direction horizontale et verticale vers le haut, et à la transmission des modifications locales via les petites déformations du fluide.

Il ne s'agit pas de résultats éclatants, et cependant, compte tenu de la durée limitée et du caractère très ciblé et spécifique de l'intervention, ils nous semblent pouvoir confirmer le bien fondé des prémisses principales à la base de sa conception.

Il faut aussi considérer que les modifications cibles de la séquence sont vérifiées, dans une partie du post-test, sur des questions auxquelles, en général, les populations témoins de ce niveau donnent des réponses majoritairement correctes. Au questionnaire "Poissons", les réponses non correctes du groupe de contrôle représentent en moyenne un tiers du total pour la question 1, et elles sont encore plus rares pour les questions 2 et 3. Dans ce cas, il s'agit donc d'agir sur *une minorité qui se trompe*, et donc les améliorations, en termes de pourcentages absolus, ne peuvent être que petites.

Nous avons vu que ces bénéfices de la séquence s'arrêtent lorsqu'il s'agit de mettre en relation la poussée d'Archimède et les forces locales associées à la pression, ce qui aurait constitué, dans notre projet, la dernière étape de compréhension visée. En effet, la poussée d'Archimède n'avait pas été travaillée explicitement dans le déroulement de la séquence, par faute de temps, due aux contraintes extérieures. Cela pourra faire l'objet d'un projet ultérieur de modification de la séquence, comportant un prolongement visant spécifiquement ce sujet.

En revanche, du point de vue de l'expérimentation faite, ce résultat négatif, mis à côté de ceux qui sont positifs, peut aider à mieux cerner les succès et les limites du dispositif expérimenté et des éléments proposés, censés agir efficacement.

On peut dire que la séquence, telle qu'elle a été proposée en 2000, favorise la compréhension des interactions locales dans un fluide et entre le fluide et les parois d'un

récepteur ou d'un solide immergé, mais ne produit pas à elle seule une réorganisation conceptuelle spontanée au sujet de la poussée d'Archimède. Une bonne compréhension des caractéristiques des forces de pression agissant sur un objet immergé dans un liquide, comme celle qui s'est manifestée dans le groupe expérimental de l'an 2000, ne conduit pas spontanément à une mise en relation efficace entre ces forces et la poussée d'Archimède.

D'ailleurs, notre étude sur les conceptions (chapitres 4 et 5) avait mis en évidence la persistance et l'ampleur des difficultés des étudiants sur ce sujet. Le passage des interactions locales à une formule intégrale semblait hors de la portée de la grande majorité des étudiants interrogés. Sur ce dernier point, une action spécifique semble nécessaire, ce qui semble possible à faible coût, sur la base des aspects déjà travaillés dans la séquence actuelle.

Notre but était de mettre à l'épreuve une approche didactique pour l'enseignement de la statique des fluides, utilisant un modèle mésoscopique. Les résultats obtenus ont montré plusieurs signaux positifs, ils permettent de cerner les aspects efficaces et les limites du modèle et nous donnent des indications importantes pour son insertion dans un cours de statique des fluides.

Les débats

Rappelons que les débats des étudiants se déroulent autour de la situation des trois récepteurs de formes différentes $\backslash_ /$, $_|$, $/_ \backslash$, où il s'agit de comparer les forces exercées par l'eau sur le fond des trois récepteurs.

Avant tout, on constate que l'idée simple de l'égalité de la pression à une même hauteur n'est pas en mesure de convaincre les étudiants et ne suffit donc pas à garantir une solution complète du problème. Parfois elle est acceptée d'emblée, mais ensuite discutée ou rejetée, car elle ne semble pas compatible avec une analyse plus attentive, en termes de forces. Il est nécessaire de parvenir à une élaboration plus fine, pour accepter finalement la solution correcte de l'égalité des forces pour les trois récepteurs.

Dans ce travail, les étudiants utilisent massivement le modèle des balles de mousse, mais le modèle ne devient productif que lorsque les interactions entre les boules sont considérées. En effet, tant que les boules sont dessinées ou pensées éparses et non en contact, le modèle n'est pas vraiment pris en charge, il est plutôt un souvenir visuel qu'un *modèle opératoire*. Dès que des boules jointives apparaissent, au contraire, l'utilisation de ce modèle s'active dans les raisonnements et met en mouvement une nouvelle typologie de problèmes et de solutions.

Souvent, l'évocation de quelques éléments de la séquence est décisive pour surmonter un blocage dans le débat :

«D'accord, ...on va faire...comme l'histoire de la main qui appuie».

«Pour ce qui est d'ici, on a suivi le même chemin de raisonnement que dans le cas où on avait fait un récepteur complexe la dernière fois».

Il faut dire, toutefois, que l'utilisation du modèle n'est pas toujours suffisante, il semble y avoir un *seuil de compétence* pour bien en profiter. Les étudiants doivent être en mesure de manipuler la mécanique élémentaire des forces, notamment la décomposition vectorielle.

En tout cas, même lorsqu'il ne résout pas toutes les difficultés, on observe souvent que le modèle change le regard de l'étudiant sur la situation physique proposée et active des raisonnements moins simplistes et plus puissants dans l'argumentation. Il favorise le passage de l'idée ingénue du «tout poids» ou du «poids du fluide au-dessus» à une analyse plus articulée, prenant en compte les interactions dans toutes les directions et la transmission des actions, dans le souci de trouver une cohérence entre les différents aspects de la description du système.

Les indications des enseignants

L'avis des enseignants est un élément essentiel pour évaluer les chances qu'a une séquence d'être effectivement reprise dans l'enseignement, et pour orienter son adaptation aux situations des classes. Nous avons, à ce propos, quelques éléments d'information.

Les principaux points positifs, selon les enseignants consultés, sont : le caractère « concret », « visuel », « simple », du modèle ; l'intérêt de l'analogie entre la mécanique et l'hydrostatique ; la mise en œuvre de notions de mécanique, et particulièrement de la troisième loi de Newton, pouvant aider à la compréhension d'un sujet considéré en général difficile.

« Le modèle permet une perception concrète du phénomène, de comprendre ce qui se passe réellement »

« C'est plus abordable, car plus visuel (concret), facilité de compréhension ».

« Permet de modéliser sans trop simplifier. Permet d'éviter d'utiliser seulement des lois à appliquer, mais de réellement comprendre ».

Le principal point négatif indiqué, en référence à une éventuelle utilisation aux niveaux scolaires plus bas (collège, début lycée), a été la difficulté de la séquence, liée à cette nécessité de maîtriser certaines notions de mécanique, en particulier la troisième loi de Newton. La longueur de la séquence et le temps qu'elle requiert sont aussi souvent évoqués par les enseignants, ce qui surprend un peu, vu qu'elle ne dure que trois heures.

Sans doute faut-il rapprocher les réactions de ces enseignants des témoignages qu'ils donnent sur ce qu'ils ont eux-mêmes appris lors de la présentation de la séquence. Le fait d'avoir eu la sensation d'avoir appris des choses partiellement nouvelles, peut les conduire à surestimer les éventuelles difficultés des élèves.

Quoiqu'il en soit, devant des réactions partagées comme celles-ci, tout en tenant compte des craintes et de difficultés exprimées, il ne faut pas s'y arrêter totalement ; il faut aussi tenter de les réduire ou de les surmonter, en employant des outils appropriés d'interaction (formation, diffusion, débats).

De toute façon, ces enseignants posent à juste titre le problème de l'adaptation nécessaire de la séquence à des niveaux scolaires différents, problème qui pourra faire l'objet d'une suite de notre recherche.

La question du développement de notre approche se pose également.

9.3 Les trois niveaux

Nous avons déjà beaucoup souligné l'importance du choix d'un niveau mésoscopique de description, qui autorise à la fois une analyse locale et l'idée de contact entre des objets facilement identifiables.

Plus généralement, notre idée est qu'il faut habituer les élèves à raisonner en utilisant, selon les cas, les trois niveaux, macroscopique, mésoscopique et microscopique.

Ces trois étages de la description structurent les explications et les théories de la physique. Le passage direct entre le microscopique et le macroscopique est, dans beaucoup de situations, impraticable à moins de faire appel à la mécanique statistique et/ou de renoncer à des détails et des possibilités de représentations qui demandent un niveau intermédiaire. On peut citer les exemples du frottement, de l'écoulement des fluides et de tous les cas où des irrégularités et des variations locales à "petite échelle" sont concernées. D'ailleurs c'est ce qu'on fait implicitement, sans trop spécifier, chaque fois qu'on parle de pression, de température, de densité ou de vitesse dans un point d'un fluide.

Notre proposition didactique est de travailler sur cet aspect, en explicitant l'usage fait du niveau mésoscopique, aussi dans le but de rendre les élèves conscients des hypothèses à la base de cette démarche et capables de coordonner les trois niveaux différents.

Si deux finalités générales de l'enseignement de la physique sont de fournir des outils conceptuels pour décrire et interpréter l'environnement naturel et de faire apprendre certaines méthodes et théories des physiciens, pour les deux finalités se pose le problème de faire comprendre les relations entre les trois niveaux de description. La décomposition en éléments mésoscopiques est, en effet, un outil et une méthode typique et très largement utilisée de l'activité du physicien.

En ce qui concerne l'étude des liquides, le choix du niveau mésoscopique s'impose plus nettement encore, car il est ardu de donner des explications simples, via la mécanique élémentaire, de phénomènes macroscopiques relatifs aux liquides, en termes de comportement des molécules. Cela parce que l'interprétation microscopique de la pression y est beaucoup plus complexe que pour les gaz. Dans les gaz, on peut bien négliger, en première approximation, les forces intermoléculaires et se limiter à considérer la contribution à la pression associée à la cinétique moléculaire, quitte à ajouter, le cas échéant, à un niveau scolaire adapté, les corrections dues aux interactions entre molécules. Pour les liquides, au contraire, les deux contributions ont le même ordre de grandeur, il est donc indispensable de les considérer ensemble, ce qui complique beaucoup les choses.

En tout cas, même pour les gaz, l'interprétation des propriétés macroscopiques en termes du modèle particulaire microscopique n'est pas sans poser maintes difficultés, si l'on veut garder le caractère élémentaire de l'étude.

L'identification de la pression avec le tassement des particules est simple et immédiat pour les élèves, mais ceux-ci demeurent souvent dans une description trop simpliste et exclusivement géométrique, de petites billes rondes éparses dans un récipient. Avec cette image toute géométrique, il devient bien possible de comprendre la compressibilité des gaz, mais il est ardu de comprendre la résistance à la compression, vu qu'elle ne commence pas avec le contact entre particules, mais se manifeste déjà lorsque les distances entre particules sont beaucoup plus grandes que leur taille.

Et, si l'on tient compte de la gravité, il est difficile de comprendre pourquoi les particules

ne s'amassent pas toutes en bas, bien tassées les unes sur les autres, ou pourquoi elles devraient être moins nombreuses en haut qu'en bas. La cinétique, bien sûr, rend compte de tout cela, mais les recherches didactiques ont bien montré les difficultés des élèves à gérer efficacement cet aspect et la tendance spontanée à attribuer aux particules microscopiques (molécules ou atomes) les mêmes propriétés que celles des corps macroscopiques.

Il est évident que l'usage du modèle particulaire microscopique est incontournable pour une compréhension profonde de la physique et pour traiter de façon unifiée différentes phénoménologies, outre qu'il est important par lui-même, comme un acquis central de la science. Toutefois, il n'est pas nécessaire, ni souhaitable, de revenir toujours à ce niveau de description.

Un niveau intermédiaire, mésoscopique, permet, dans certaines situations, d'activer un raisonnement local, en divisant par la pensée le système matériel en petites parties en interaction, sans s'impliquer dans les difficultés engendrées par le niveau microscopique.

En effet, les éléments constitutifs de la fragmentation mésoscopique peuvent garder les propriétés fondamentales des objets macroscopiques et donc être traités comme étant des petits morceaux, des petits objets, ayant une température, une densité, une élasticité et pouvant agir l'un sur l'autre par contact, même en situation statique. Surtout, pour se faire une "image" de leur comportement, on peut faire appel à l'intuition dérivée de l'expérience ordinaire avec les objets de la vie quotidienne, chose qui serait discutable avec des molécules.

Pour une suite de la présente recherche, nous avons déjà indiqué des lignes de développement envisageables, concernant une adaptation de l'intervention didactique à des niveaux scolaires différents, un prolongement de la séquence pour aborder explicitement, via le modèle proposé, la connexion entre la poussée d'Archimède et les forces de pression, l'utilisation du modèle dans des situations relatives aux gaz et à l'interface entre gaz et liquide. Plus en général, une coordination plus complète du modèle dans un cours de statique des fluides peut être étudiée, envisageant éventuellement l'introduction d'autres activités et d'autres outils.

La question de la transition entre les niveaux mésoscopique et microscopique se pose aussi comme une autre direction de développement de la recherche. Cette transition est nécessaire pour une compréhension réconciliée des propriétés des fluides que l'on met usuellement en rapport avec la cinétique des particules (surtout pour les gaz) et de celles qui sont mises en avant dans l'analyse macroscopique de systèmes tels qu'un liquide dans un récipient ou une atmosphère gazeuse.

Dans cette direction, une nouvelle étape de modélisation pourrait suivre, qui permette de « rentrer » dans l'unité mésoscopique, en menant à l'échelle microscopique des particules constituant le fluide. Cette étape ultérieure devra permettre une approche des propriétés thermoélastiques des fluides et une interprétation de la pression dans les liquides tenant compte des contributions associées à la cinétique moléculaire et aux forces intermoléculaires.

CHAPITRE 10. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Aitken F., Tobazéor R. (1998) Une histoire de pression : la compressibilité des liquides. *Bulletin de la S.F.P.*, 114, mai 98, pp.4-9.
- Andersson B., Bach F. (1996) Developing New Teaching Sequences in Science: The Example of "Gases and Their Properties". In *Research in Science Education in Europe, Current Issues and Themes*, Welford G., Osborne J., Scott P. (eds), The Falmer Press, London.
- Andreani Dentici O., Grossi M.G., Borghi L., De Ambrosis A., Massara C.I. (1984) Understanding floating: A study of children aged between six and eight years. *European Journal of Science Education*, 6(3), pp.235-243.
- Artigue M. (1988) Ingénierie didactique. *Recherches en Didactique des Mathématiques*, Vol. 9, n°3, pp.281-308.
- Artigue M. (1990) Epistémologie et Didactique. *Recherches en Didactique des Mathématiques*, Vol.10, pp.241-286.
- Bachelard, G. (1938) *La formation de l'esprit scientifique*, Vrin, Paris.
- Banon N. (1995) *La poussée d'Archimède : étude de représentations, analyse de programme et manuels*. Projet de recherche, DEA de didactique de sciences physiques, Université de Paris 7.
- Bardin L. (1993) *L'analyse de contenu*, PUF, Paris.
- Beaufils D. (1995) Enseignement de science expérimentale: questions de vigilances. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, 776, pp.1283-1294.
- Bernardini C., Tarsitani C., Vicentini M. (eds) (1995) *Thinking Physics for Teaching*, Plenum Press, New York and London.
- Besson U. (1990) *Una ricerca didattica sul concetto di pressione*, Tesi di laurea, Università di Roma.
- Besson U. (1992) Rappresentazioni mentali e strutture logiche. *Schola Europaea*, n.114.
- Besson U. (1995) La pressione. *La Fisica nella scuola*, 28, 1, p.8-14.
- Besson U. (1996) La pressione nei gas reali: l'interpretazione classica dell'equazione di Van der Waals è corretta ? *Giornale di Fisica*, XXXVII, 1, p.45-54.
- Besson U. (1996) *Le frottement solide sec de glissement*, Rapport de tutorat, DEA de didactique de sciences physiques, Université Paris 7.

- Besson U. (1997) *La pression dans les fluides : étude des raisonnements des élèves concernant la pression dans les fluides et la poussée d'Archimède et proposition d'une démarche d'enseignement*, Projet de recherche, Mémoire du DEA de Didactique des Disciplines, Université Paris 7.
- Besson U. (1999) Bilans énergétiques : une mise au point conceptuelle. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, n° 812, mars, p.383-405.
- Besson U. (2000) Pressione cinetica e pressione molecolare. *Giornale di Fisica*, XLI, 1, pp. 51-56
- Besson U., Viennot L., Lega J. (2001a) Pression et statique des fluides : un début de modélisation. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, n° 834, pp.825-840.
- Besson U., Lega J., Viennot L. (2001b) Using anchoring conceptions for teaching statics of fluids. In *Physics Teacher Education Beyond 2000, International Conference of GIREP, Selected Contributions*, R. Pinto & S. Surinach (eds), Elsevier Editions, Paris, pp. 281-284.
- Besson U., Viennot L., Lega J. (2001c) A mesoscopic model of liquids for teaching statics of fluids. In *Science Education Research in the Knowledge Based Society, Proceedings of the Third International Conference of ESERA*, Psillos D. et al. (eds), Thessaloniki, Greece, pp. 304-306.
- Besson U., Viennot L., Lega J. (2001d) Un modèle mésoscopique de liquide pour l'enseignement de la statique des fluides. In *Actes des Deuxièmes Rencontres Scientifiques de l'ARDIST, Scholê*, numéro hors série, 2001, IUFM de l'académie d'Aix-Marseille.
- Borghi L., De Ambrosis A., Massara C.I., Grossi M.G., Zoppi D. (1988) Knowledge of air: A study of children aged between 6 and 8 years. *International Journal of Science Education*, 10(2), pp.179-188.
- Borghi L., De Ambrosis A., Falomo L., Mascheretti P. (1993) Environnements multimédias pour l'étude de la physique. *Didaskalia*, 2, pp.49-59.
- Borghi L., De Ambrosis A., Invernizzi C., Mascheretti P. (1996) Un modèle pour la compréhension des propriétés des liquides. *Didaskalia*, 8, pp.139-153.
- Brasquet M. (1999) Actions, interactions et schématisation. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, n°816, pp 1220-1236.
- Bridgman P.W. (1958) *The Physics of High Pressure*, London, G. Bell and Sons, LTD.
- Chauvet F. (1994) *Une séquence d'enseignement sur la couleur*. Thèse de doctorat, LDPES, Université de Paris 7.
- Chauvet, F. (1996a) Un instrument pour évaluer un état conceptuel: exemple du concept de couleur, *Didaskalia*, n°8, pp 61-79.

- Chauvet, F. (1996b). Teaching colour: designing and evaluation of a sequence, *European Journal of Teacher Education*, vol.19, n°2, pp 119-134.
- Chevallard Y. (1985) *La transposition didactique*, Ed. La Pensée Sauvage, Grenoble.
- Chomat, A., Larcher, C. et Méheut, M. (1988) Modèle particulière et activités de modélisation en classe de quatrième. *Aster*, 7, pp 143-184.
- Chomat, A., Larcher, C. et Méheut, M. (1992) Modèle particulière et démarche de modélisation en classe de quatrième. In Equipe INRP LIREST (eds), *Enseignement et apprentissage de la modélisation en science*, Paris, INRP.
- Clement J., Brown D., Zietsman A. (1989) Not all preconceptions are misconceptions: finding "anchoring conceptions" for grounding instruction on students' intuitions. *International Journal of Science Education*, 11, pp.554-565.
- Closset J.L. (1993) Reasoning about electricity and water circuits: teaching consequences in electricity. In *Learning electricity and electronics with advanced educational technology*, Caillot M. (ed), NATO ASI series F, vol.115.
- Colin P. (1999a) *Deux modèles dans une situation de physique: le cas de l'optique*, Thèse de Doctorat, LDSP, Université de Paris 7.
- Colin P., (1999b) Two Models for a Physical Situation: The Case of Optics. Students' Difficulties, Teachers' Viewpoints and Guidelines for a 'Didactical Structure', in *Proceedings of ESERA*, M. Komorek et al. (Eds.), Kiel, Vol 2, pp.143-145 ; and: (2001) *Research in Science Education, Past, Present and Future*, H. Behrendt, H. Dahncke, R. Duit, W. Gräber, M. Komoreck, A. Kross, P. Reiska (Eds), Dordrecht, Kluwer, pp.241-246.
- De Berg K.C. (1992) Students' thinking in relation to pressure-volume changes of a fixed amount of air : the semi-quantitative context. *International Journal of Science Education*, 14, pp.295-303.
- De Kleer J., Brown J.S. (1983) Assumptions and ambiguities in mechanistic mental models. In Gentner D., Stevens A.L. (eds), *Mental models*, Lawrence Erlbaum, New Jersey.
- Désautels J., Larochelle M. (1992) *Autour de l'idée de science*, De Boeck Université.
- DiSessa A.A. (1981) Phenomenology and the Evolution of Intuition. *DSRE Working Papers*, Massachusetts Institute of Technology. Also in *Mental Models*, Gentner D., Stevens A.L. (eds), Lawrence Erlbaum, Hillsdale, New Jersey, 1983.
- Diu B., Guthmann C., Lederer D., Roulet B. (1989) *Physique Statistique*, Hermann, Paris.
- Driver, R. (1989) Students' conceptions and the learning of science. *International Journal of Science Education*, 11, special issue, pp.481-490.

- Duit R. (2001) Educational Reconstruction: Science Subject Matter and Educational Issues in Harmony – Research and Development Intimately Linked. In *Science Education Research in the Knowledge Based Society, Proceedings of the Third International Conference of ESERA*, Psillos D. et al. (eds), Thessaloniki, Greece, pp. 227-229.
- Dupré, F. (1986) Gravità, pressione dell'aria e senso comune. *La Fisica nella scuola*, XIX, p.129
- Encyclopédie Quillet* (1994) Mécanique des fluides, pp. 219-229.
- Engel Clough E., Driver R. (1985) What do children understand about pressure in fluids ? *Research in Science and Technological Education*, 3, pp.133-144.
- Feynman R. (1963) *The Feynman lectures on physics*, vol.2, Addison Wesley.
- Fensham P., Gunstone R., White R. (eds) (1994) *The Content of Science. A Constructivist Approach to its Teaching and Learning*, The Falmer Press, London.
- Galili, Y., Hazan, A. (2000) Learners' knowledge in optics, *International Journal of Science Education*, 22 (1), 57-88.
- Gié H., Sarmant J-P. (1988) *Mécanique*, Vol.2, Paris, Lavoisier.
- Giese P.A. (1987) Misconceptions about water pressure. In Novak J. *Proceeding of the second international seminar on Misconceptions and Educational Strategies in Science and Mathematics*, Ithaca, Cornell University, Vol.2, pp.143-148.
- Glaserfeld E. von (1988) Introduction à un constructivisme radical. In Watzlawick P. (ed) *L'invention de la réalité. Contributions au constructivisme*, Paris, Editions du Seuil.
- Gutwill J., Frederiksen J., Ranney M. (1996) Seeking the casual connection in electricity: shifting among mechanistic perspectives. *International Journal of Science Education*, 18(2), pp.143-162.
- Guyon E., Hulin J.-P., Petit L. (1991) *Hydrodynamique physique*, Paris.
- Halbwachs F. (1971) Réflexions sur la causalité physique. Causalité linéaire et causalité circulaire en physique. In Bunge et al. *Les théories de la causalité*, Paris, PUF.
- Hashweh M.Z. (1986) Toward an explanation of conceptual change. *European Journal of Science Education*, 8(3), p.229-249.
- Hewson M.G., Hewson P.W. (1983) Effect of instruction using students' prior knowledge and conceptual change strategies on science learning. *Journal of research in Science teaching*, 20, pp.731-743.
- Hewson M.G. (1986) The acquisition of scientific knowledge : analysis and representation of student conceptions concerning density. *Science education*, 70(2), pp.159-170.

- Hewson P.W. (1982) A case study of conceptual change in special relativity: the influence of prior knowledge in learning. *European Journal of Science Education*, 4, pp.61-78.
- Hewson P.W., Thorley N.R. (1989) The conditions of conceptual change in the classroom. *International Journal of Science Education*, 11, special issue, pp.541-553.
- Hirn C. (1998) *Transformations d'intentions didactiques par les enseignants: le cas de l'optique élémentaire en classe de quatrième*, Thèse de Doctorat, LDPES, Université de Paris 7
- Hirn C. (1995) Comment les enseignants en sciences physiques lisent-ils les intentions didactiques des nouveaux programmes de quatrième ?, *Didaskalia*, 6, pp.39-54
- Hirn C., Viennot L. (2000) Transformation of Didactic Intentions by Teachers: The Case of Geometrical Optics in Grade 8 in France, *International Journal of Science Education*, 22, 4, pp.357-384.
- Jacquot, D. (2000) *Conceptions de l'état gazeux et de la pression des élèves entrant en Seconde*, Mémoire de Tutorat, DEA de Didactique Université Paris 7.
- Kariotoglou P., Psillos D., Vallasiades O. (1990) Understanding pressure : didactical transposition and pupils' conceptions. *Physics Education*, 25, p.92-96.
- Kariotoglou P., Koumaras P., Psillos D. (1993) A constructivist approach for teaching fluid phenomena. *Physics Education*, 28, 3, p.164-169.
- Kariotoglou P., Psillos D. (1993) Pupils' pressure models and their implications for instruction. *Research in Science and Technological Education*, 11, 1, pp.95-108.
- Kariotoglou P., Koumaras P., Psillos D. (1995) Différentiation conceptuelle : un enseignement d'hydrostatique, fondé sur le développement et la contradiction des conceptions des élèves. *Didaskalia*, n°7, p.63-90.
- Kariotoglou P., Psillos D. (1999) Teaching fluids: intended knowledge and students' actual conceptual evolution. *International Journal of Science Education*, 20, n°9, pp. 1075-1088.
- Koliopoulos D., Kariotoglou P., Psillos D. (1986) La force dans le contexte des liquides : une première approche des conceptions des élèves sur la statique des liquides au collège en Grèce. *Feuilles d'Epistemologie Appliquée et de didactique des sciences*, pp. 59-65.
- Koumaras P., Kariotoglou P., Psillos D. (1994) Devons-nous utiliser des activités évolutives en introduction à l'étude de l'électricité? Le cas de la résistance. *Didaskalia*, 1(4), pp. 107-120.
- Landau L., Lifchitz E. (1971) *Mécanique des fluides*, Editions Mir, Moscou.

- Leach J., Scott P. (2000) *The concept of learning demand as tool for designing teaching sequences*. Paper prepared for the meeting "Research-based teaching learning sequences", University of Paris VII.
- Leach J., Hind A., Lewis J., Scott P. (2001) Designing and Implementing science teaching drawing upon research evidence about science learning. In *Science Education Research in the Knowledge Based Society, Proceedings of the Third International Conference of ESERA*, Psillos D. et al. (eds), Thessaloniki, Greece, pp. 138-140.
- Lijnse P.L. (1994) La recherche-développement: une voie vers une "structure didactique" empiriquement fondée. *Didaskalia*, 3, p.93-108.
- Lijnse P.L., Licht P., de Woos W., Waarlo A.J. (eds) (1990) *Relating macroscopic phenomena to microscopic particles: a central problem in secondary science education*, CD-β press, Utrecht.
- Locqueneux, R. (2001) Les théories physiques aux environs de 1900. In *Physique et humanités scientifiques. Autour de la réforme de l'enseignement de 1902*, N. Hulin (éd.), Villeneuve d'Ascq, Presses Universitaire du Septentrion.
- Mayer M., Vicentini M. (1996) *Didattica della Fisica*. Firenze, La Nuova Italia.
- McClelland J.A.C. (1987) Pressure points. *Physics Education*, 22, pp.107-109.
- Méheut M., Chomat A. (1990) The bounds of children's atomism: an attempt to make children build up a particulate model of matter. In *Relating macroscopic phenomena to microscopic particles: a central problem in secondary science education*, Lijnse P.L., Licht P., de Woos W., Waarlo A.J. (eds), CD-β press, Utrecht, pp. 266-282.
- Méheut, M., Chomat, A. & Larcher, C. (1994) Construction d'un modèle cinétique de gaz par des élèves de collège: jeux de questionnement et de simulation. In *Actes du Quatrième Séminaire National de la Recherche en Didactique des Sciences Physiques*, M. Caillot (ed.), Amiens, IUFM de Picardie, pp 53-71.
- Méheut M. (1996) Enseignement d'un modèle particulaire cinétique de gaz au collège. *Didaskalia*, 8, pp.7-32.
- Méheut, M. (1997) Designing a learning sequence about a pre-quantitative kinetic model of gases : the parts played by questions and by a computer simulation. *International Journal of Science Education*, 19, n°2, pp647-660.
- Méheut, M. (2001) Two aspects of the relations between research and développement. In *Proceedings of the Third International Conference of ESERA, Science Education Research in the Knowledge Based Society*, Psillos D. et al. (eds), Thessaloniki, Greece, pp. 239-241.

- Ministère de l'Education Nationale (1999) Programme de la classe de Seconde Générale et Technologique. *B.O.* n°6, Hors Série, pp 5-23. Et (2000) *Document d'accompagnement*, CNDP.
- Mullet E., Montcouquiol A. (1988) Archimedes' effect, information integration and individual differences. *International Journal of Science Education*, 10(3), pp.285-301.
- Noce G., Torosantucci G., Vicentini Missoni M. (1988) The floating of objects on the moon: prediction from a theory or experimental facts ? *International Journal of Science Education*, 1, pp.61-70.
- Nussbaum J. (1989) Classroom conceptual change: philosophical perspectives. *International Journal of Science Education*, 11, special issue, pp.530-540.
- Ogborn J. (1993) Approche théorique et empirique de la causalité. *Didaskalia*, 1, pp.29-47.
- Piaget J., Inhelder B. (1955) *De la logique de l'enfant à la logique de l'adolescent*, Paris, PUF.
- Piaget J., Inhelder B. (1962) *Le développement des quantités physiques chez l'enfant*, Delachaux & Niestlé, Paris-Neuchâtel.
- Piaget J., Garcia R. (1971) *Les explications causales*, PUF, Paris.
- Pinto R., Ametler J., Chauvet F., Colin P., Giberti G., Monroy G., Ogborn J., Ormerod F., Sassi E., Stylianidou F., Testa I., Viennot L. (2000) *Investigation on the Difficulties in Teaching and Learning Graphic Representations and on Their Use in Science Classrooms*, STTIS Transversal Report (WP2).
- Pisani C. (1982) *Utilisation par les adultes de quelques notions de physique comme pression et chaleur*, Thèse de doctorat, Université de Paris 7.
- Posner G.J., Strike K.A., Hewson P.W., Gertzog W.A. (1982) Accomodation of a scientific conception: toward a theory of conceptual change. *Science Education*, 66(2), pp.211-227.
- Prigogine I., Stengers I. (1988) *Entre le temps et l'éternité*, Fayard.
- Psillos D., Koumaras P. (1993) Multiple causal modelling of electrical circuits for enhancing knowledge intelligibility. In Caillot M. (ed) *Learning electricity and electronics with advanced educational technology*, NATO ASI series F, vol.115, Berlin, Springer-Verlag, pp. 57-75.
- Psillos, D. (1995) Adapting instruction to student's reasoning. In *European research in science education, Proceeding of the Second Ph. D. Summer School*, Psillos D. (ed), Thessaloniki, Grèce, pp.57-71.

- Pugliese Jona S. (1984) *Fisica e laboratorio*, Vol.1, Loescher, Torino.
- Rainson S. (1995) *Superposition des champs électriques et causalité*, Thèse de doctorat, LDSP, Université de Paris 7.
- Rainson S., Viennot L. (1998) Charges et champs électriques: difficultés et éléments de stratégies pédagogiques en Mathématiques Spéciales Technologiques. *Didaskalia* n°12, pp.31-59.
- Resnick R., Halliday D., Krane K.S. (2001) *Physics*, John Wiley & Sons, New York, vol. 1.
- Rollnick M., Rutherford M. (1990) African primary school teacher: what ideas do they hold on air and air pressure ? *International Journal of Science Education*, 12(1), pp.101-114
- Rollnick M., Rutherford M. (1993) The use of a conceptual change model and mixed language strategy for remediating misconceptions on air pressure. *International Journal of Science Education*, 15(4), pp.363-381.
- Rozier S. (1988) *Le raisonnement linéaire causal en thermodynamique classique Élémentaire*. Thèse de doctorat, Université Paris 7.
- Rozier S., Viennot L. (1991) Students' Reasoning in Thermodynamics, *International Journal of Science Education*, vol. 13 n°2, pp 159-170.
- Ruggiero S., Cartelli A., Dupré F., Vicentini Missoni M. (1985) Weight, Gravity and Air Pressure : Mental Representations by Italian Middle Schools Pupils. *European Journal of Science Education*, 7, 2, p.181-194.
- Saltiel E. (1978) *Concepts cinématiques et raisonnements naturels: étude de la compréhension des changements de référentiels galiléens par les étudiants en sciences*. Thèse de doctorat, Université Paris 7.
- Séré M.G. (1982) A study of some frameworks used by pupils aged 11 to 13 years in the interpretation of air pressure. *European Journal of Science Education*, 4, 3, pp.299-309.
- Séré M.G. (1985a) *Analyse des conceptions de l'état gazeux qu'on les enfants de 11 à 13 ans, en liaison avec la notion de pression, et propositions de stratégies pédagogiques pour en faciliter l'évolution*. Thèse de doctorat d'état. Université de Paris 6.
- Séré M.G. (1985b) The gaseous state. In Driver R., Guesne E., Tiberghien A. (eds) *Children's ideas in science*, Milton Keynes, Open University Press, pp.104-123.
- Séré M.G. (1986) Children's conceptions of gaseous state, prior to teaching. *European Journal of Science Education*, 4, pp.413-425.

- Séré M.G. (1990) Passing from one model to another: which strategy ? In Lijnse, P.L. & alt. (eds) *Relating macroscopic phenomena to microscopic particles*, Utrecht, CD press, pp. 50-66.
- Sherwood B.A. & Chabay R.W. (1993) Conceptual model for understanding the behaviour of electrical circuits. In Caillot M. (ed) *Learning electricity and electronics with advanced educational technology*, NATO ASI series F, vol.115, Springer-Verlag, Berlin, pp. 23-35.
- Stachel D., Stavy D. (1985) Children's ideas about solid and liquid. *European Journal of Science Education*, 4, pp.407-421.
- Stavy R. (1988) Children conception of gas. *International Journal of Science Education*, 5, pp.553-560.
- Steinberg, M.S. (1983) Reinventing Electricity. In Helms H. & Novak J. (eds) *Proceeding of the International Seminar on Misconceptions in Science and Mathematics*, Ithaca, Cornell University, pp. 406-419.
- Steinberg, M.S. (1987) Transient electrical processes as resources for causal reasoning. In Novak J. (ed) *Proceeding of the second international seminar on Misconceptions and Educational Strategies in Science and Mathematics*, Ithaca, Cornell University, pp. 480-489.
- Strike K.A., Posner G.J. (1982) Conceptual change and science teaching. *European Journal of Science Education*, 4, pp.231-240.
- Tiberghien. (1994) Modelling as a basis for analysing teaching learning situations. *Learning and Instruction*, 4, pp. 71-87.
- Vicentini M. (1995) Conceptual change for Teachers and Researchers. In Bernardini C., Tarsitani C., Vicentini M. (eds), *Thinking Physics for Teaching*, Plenum Press, New York and London.
- Viennot L. (1989) Obstacle épistémologique et raisonnement en physique : tendance au contournement des conflits chez les enseignants. In Berdnaz N., Garnier C. (eds) *Construction des savoirs, obstacles et conflits*. CIRADE, Montréal, pp.117-129.
- Viennot L. (1989) Tendance à la réduction fonctionnelle : obstacle au savoir scientifique et objet de consensus. In Berdnaz N., Garnier C. (eds) *Construction des savoirs, obstacles et conflits*. CIRADE, Montréal, pp.84-92
- Viennot L. (1993) Temps et causalité dans les raisonnements des étudiants. *Didaskalia*, 1, p.13-27.
- Viennot L. (1996) *Raisonnement en physique*, De Boeck Université, Paris.

- Viennot L. (1999) Didactics of Physics at university level: looking differently at Physics, Keynote address, meeting of the Deutsche Physikalische Gesellschaft, In *Didaktik der Physik, Physikertagung*, Ludwigsburg, pp.67-80.
- Viennot L. (2001) Relating research in didactics and actual teaching practice: impact and virtues of critical details. In *Science Education Research in the Knowledge Based Society, Proceedings of the Third International Conference of ESERA*, Psillos D. et al. (eds), Thessaloniki, Greece, pp. 22-24.
- Viennot L., Rainson S. (1999). Design and evaluation of a research-based teaching sequence: The superposition of electric fields. *International journal of Science Education*, Vol 21 (1), 1-16
- Viennot L., Chauvet F., Giberti G., Gomez R., Hirn C., Monroy G., Ogborn J., Pinto R., Sassi E., Stylianidou F., Testa I. (1999) *Investigation on Teacher Transformations when Implementing Teaching Strategies*, STTIS Transversal Report (WP3).
- Violino P., Di Giacomo B.S. (1981) An Investigation of piagetian Stages in Italian Secondary School Students. *Journal of Chemical Education*, 58, p. 639.
- White R.T., Gunstone R.F. (1989) Metalearning and conceptual change. *International Journal of Science Education*, 11, special issue, pp.577-586.
- White B., Frederiksen J., Spohrer K. (1993) Conceptual models for understanding the behavior of electrical circuits. In Caillot M. (ed) *Learning electricity and electronics with advanced educational technology*, NATO ASI series F, vol.115, Berlin, Springer-Verlag, pp. 77-95.

ANNEXE : TRANSCRIPTIONS DES DÉBATS DES ÉTUDIANTS

Débat 1

Groupe B32, Mardi 22 Février 2000, 14h.

Récipients : a) $\backslash _ /$, b) $| _ |$, c) $/ _ \backslash$

- 1A [a propos du récipient a $\backslash _ /$] Si tu as deux molécules à la même hauteur, et qu'il n'y a pas la même hauteur au dessus, elles sont quand même à la même pression, ces deux là elles sont quand même à la même pression,... Toutes les molécules qui sont ici sont à la même pression, toutes les molécules qui sont ici sont à la même pression.
- 2B Elles sont à la même pression quand c'est la même chose au dessus, ...quand c'est le cas ici, c'est plus à la même pression... C'est ça, tu vois, et le poids augmente à chaque fois.
- 3A Ouais...J'sais pas, faut voir.
- 4B Tandis que là, en fait, tu as l'autre cas... ça diminue, mais là, tu appuies vers le haut.
- 5A Ouais.
- 6B Enfin je sais pas...
- 7A Théoriquement, si t'appuies avec un piston ici...
- 8B Oui, mais tu n'appuies pas avec un piston ici, t'appuies avec ton piston là...
- 9B Oui, justement , ce qu'on a vu c'est que, quand tu pousses horizontalement, c'est la même chose, mais que quand tu appuies verticalement, ça changeait tout.
- 10A Ouais
- 11B Quoi?
- 12A Moi je sais pas...parce que normalement, toutes les particules qui sont à la même hauteur sont censées être à la même pression.
- 13B Non, parce qu'on sait bien... Oui., c'est à la même hauteur, si c'est à la même hauteur au dessus, mais ici t'as une différence, t'as plus de poids, tu vois...t'as un poids plus grand, comme t'as un peu plus de poids, ben, ça appuie plus forcément.
- 14A Oui...logique...
- 15B Donc, tout est à la même pression, c'est..., c'est normal, ben alors ici ce qui y'a, c'est que tu dois voir, là, ...euh...ce en quoi les murs comme ça vont jouer comme raison... tu dois voir si tu as une pression comme ça...or en fait tu en as une..., tu vois, t'as une pression comme ça qui va s'exercer. Tu vois...
- 16A Oui..
- 17B Maintenant, elle, elle va s'exercer comme ça, ou bien alors elle va s'exercer comme ça, tu vois les petites billes vont vraiment appuyer et puis alors, ça va plutôt s'exercer comme ça, ça je ne sais pas.
- (...)
- 18B Tu vois, si on décompose ça comme ça, tu vois, tu décomposes comme ça, et comme ça, d'accord?
- 19A Oui.
- 20B Donc là, t'es d'accord, enfin là ça...ça c'est uniforme, quoi...Sur chaque ligne horizontale, t'as la même pression
- 21A Oui. T'as chaque fois la même pression
- 22B Oui, sur chaque ligne horizontale. Quand tu changes de ligne, ...par exemple quand tu prends celle là, celle là elle a une pression plus faible...Maintenant faut voir en

- quoi les billes qui sont ici dedans vont jouer....En fait, horizontalement elles ont la même pression, en fait elles font une pression x on va dire, et là aussi et là aussi puisque ça ne change pas.
- 23A Oui, mais si, horizontalement, en fait si tu as une particule qui est là, horizontalement elle va avoir une pression comme ça et t'as celle qui est dans l'autre sens qui va avoir une pression comme ça.
- 24B Et alors là ça va s'annuler.
- 5A Donc là, de toute façon, ça s'annule.
- 26B Donc les deux, les deux là vont s'annuler partout, alors partout pareil.
- 27A C'est marrant, simplement pour la hauteur...Pour la pression verticale...
- 28B Tu auras exactement la même pression que pour le "b".
- 29A Oui, on aura la même pression.
- 30B Oui, je pense, (...) tu auras rien d'autre comme pression, mais alors tu auras quand même une pression verticale, là dessus, là contre...
- 31A Oui, mais la pression verticale, elle va être comme ça, et à mon avis elle va être compensée par la paroi.
- 32B Oui.
- 33B Même en dessous, tu crois pas qu'en dessous, tu vois, ça aura une tendance à...non...
- 34A Le gros problème c'est, tu vas avoir, d'office, une, ...une pression qui sera comme ça ...de chaque, de chaque...
- 35B Oui, mais tu pourras la décomposer...
- 36A ...et qui sera décomposable chaque fois en deux, d'office...Y va y avoir une partie...
- 37B ...qui va s'annuler..
- 38A a partie horizontale va s'annuler.
- 39B Mm...
- 40A ...et la partie verticale, elle, de toute façon, elle appuie pas sur le fond.
- 41B Oui.
- 42A ..elle appuie, elle appuie ici.
- 43B Oui, non, elle vient appuyer là en fait, elle va appuyer sur la paroi et la paroi va appuyer là.
- 44A Mais ça va pas venir appuyer sur ceci.
- 45B D'accord, OK...Donc là tu dis, en fait, que ça a la même pression, ça a la même pression dans le fond.
- 46A Ouais.
- 47B ...si ça c'est la même chose.
- 48A Donc "a" et "b"... "a" égale "b".
- 49B ...à cet endroit là.
- 50B Et alors le "c"...
- 51A Et alors le "c"...
- 52B Le "c".la pression va diminuer.
- 53A Ben, c'est justement ça que je m'dem.. Ici t'as une partie...si tu dessines le "b"...
- 54B Simplement déjà parce que t'as des billes en moins et que le poids est moins... appuie moins...
- 55A Moui
- 56B Simplement pour ça ta pression va être moindre, non?
- 57A Mm. Oui. Ben je comp... Mais alors...
- 58B Parce que, regarde, si jamais tu as fait ça, t'es d'accord, tu le transvases...En fait ce que tu peux faire, c'est que tu te dis, tu le transvases... le récipient "b", ce qui va se passer c'est que comme y en a beaucoup plus, ça va monter. Ça va monter donc tu

- auras plus de... évidemment...
- 59A Oui mais attention faut voir... c'est qu'y sont de hauteur différente, si t'as un récipient comme ça, et que tu y mets dedans une petite plaque sur laquelle tu mesures la pression et que t'as un autre récipient et qui est moitié moins là et que tu mets la même petite plaque dans le fond, tu vas avoir la même pression.
- 60B Oui mais si tu gardes la même largeur, en bas, que tu ne joues que sur la hauteur, si tu augmentes ta hauteur, c'est foutu, tu vois, si tu augmentes un petit peu ta hauteur.
- 61A Oui, mais là on ne joue que sur la hauteur, les niveaux sont chaque fois les mêmes.
- 62B Oui, donc les "a" et "b" sont les mêmes, mais le "c", le "c" tu as moins de billes forcément, tu vois, il est plus petit, tu vois, donc le poids ne saurait pas, ne saurait pas être égal, si tu crois, quoique t'a la même couche de billes, ben si, tu as quand même la même hauteur de billes, tu as le même nombre de billes si tu les additionnes comme ça
- 63A Mais seulement ici, tu n'as pas la même hauteur de billes
- 64B Ouais, et alors là tu auras moins...ta pression va diminuer alors?
- 65A Beh, soit ta pression va diminuer, (...) soit euh....
- 66B Si, elle va diminuer, parce que, ta pression à ce niveau là est liée au poids des billes, mm...
- 67A Oui.
- 68B La pression ...sera la même mais la pression des billes va varier puisque tu en as moins. Donc celui-là aurait une pression plus faible, le "c"...
- 69A Oui, mais ce n'était pas dans les propositions, t'avais soit "a" plus grand.., soit "b" plus grand, soit "c" plus grand, soit $a=b=c$. Soit celui-là est plus grand, que les deux autres, soit ils sont tous les trois égaux, c'était ça les propositions, y avait pas d'autre...Celui qui pourrait être plus grand, ça pourrait être "a".
- 70B Ca pourrait être "b" aussi. Si tu te dis...simplement si y poussait comme ça quoi ben j'sais pas.
- 71A Pour moi, le seul qui pourrait éventuellement être le plus grand c'est "a", parce que les trois fonds sont les mêmes, et celui qui contient le plus, c'est "a". Celui qui a le plus grand volume, c'est "a". Ben à mon avis, à mon avis, soit "a" est plus grand, soit ils sont les mêmes. Et à mon avis, c'est les trois les mêmes.
- 72B (...) Ben alors comment on explique le "c"? (...) parce que les billes c'est pas pareil
- 73A (...) Moi, pour moi, c'est le "c", même si t'as
- 75B Mais c'est pas du tout le même cas, enfin j'sais pas!
- 76A Si, si t'as cette bille là et cette bille là qui ont la même pression,
- 77B Mais elles n'ont *pas* la même pression
- 78A Ben si, elles l'ont, mettons qu'elles l'ont.
- 79B Oui mais elles l'ont pas!
- 80A Mettons qu'elles l'ont hein (rire), on va dire qu'elles l'ont,
- 81B On va dire qu'elles l'ont, d'accord
- 82A Alors, si elles l'ont, celle-là et celle-là ont aussi la même pression, et donc celle-là et celle-là ont la même pression. Or ici dedans, celle-là et celle-là ont la même pression la même chose ici, celle-là et celle-là, donc la pression est la même
- 83B Oui, mais non, parce que là ce n'est pas la même pression, là tu as une pression plus petite que là.
- 84A Mais justement, ça j'en sais rien, franchement pour moi je suis pas certain du tout qu'on ait.
- 85B C'est ce qu'il t'a expliqué avec ton modèle mais quand tu appuies tu as chaque fois la force là plus chaque fois tu additionnes les forces au dessus, tu vois?

- 86B (...)
 87A (...) Tu crois que celle-ci va faire monter celle-là?
 88B Oui, en fait, cette paroi-là va appuyer sur celle-là..
 89A Normalement, ici, tu n'as plus qu'une force verticale, puisque l'autre a été compensée.
 90B Oui, justement, mais puisque t'as plein de petites forces verticales, celle-là a tendance à tomber or elle reste droite donc elle va forcer sur quelque chose, elle va forcer sur celle-là, comment elles vont forcer toutes les deux? Elles vont forcer vraiment toutes les deux, je dirais enfin...Tu vois, il va y avoir en plus une autre pression qui va forcer un petit peu...oui, non, non?
 91A Oui c'est possible, mais alors il faut trouver comment ...
 92B Oui mais bon, on ne sait pas encore ...celle-là elle n'appuie pas, mais alors
 93A Mais alors la pression serait maximale ici?
 94B Oui, quoique c'est bizarre parce que cette paroi-là doit participer aussi, celle-là aussi, moi je dirais que celle-là est plus grande

Brouhaha, puis le professeur arrive

- 95A Si on prend ici, si on prend...
 96P Oui.
 97A Si on prend ici deux billes qui sont à même hauteur, normalement elles sont à la même pression?
 98P Oui, c'est ça.
 99A Donc normalement, si on prend ce récipient-ci, si on prend d'abord le vase de "b", deux particules ici sont à la même pression si elles sont à la même hauteur.
 100P Oui.
 101A La même chose si on prend dans le "a" une particule qui est là et une particule là, elles sont à la même pression et donc théoriquement dans le "c" si il y en a une qui est là et une ici, elles sont à la même pression toutes les deux, la force qui serait exercée sur le..., sur le , sur la base elle serait la même ici, ici et là.
 102P D'accord, et pourquoi est-ce que la pression là est la même que là alors que ici la hauteur de la colonne est plus grande que là?
 103A Avec la paroi qui est au dessus.
 104P Ah oui, c'est ça, c'est la force exercée par la paroi.
 105B Mais ici, elle n'ont pas la même pression les deux
 106P Ah si elles sont à la même hauteur, oui.
 107B Mais pourquoi, là il y en a quand même plus d'eau au-dessus d'elles.
 108P Oui, mais ici, il y a une force qui est exercée là aussi, et qui est différente de celle-là.
 109B D'accord, ...on va faire...comme l'histoire de la main qui appuie, quoi, parce que la force ne sera pas la même.
 110P C'est exactement, c'est comme si il y avait une main qui appuyait, mais la main n'appuie pas avec la même force ici que là.
 111B OK, d'accord.
 112A Ca va?
 113B Oui.

B 32

Debat 1

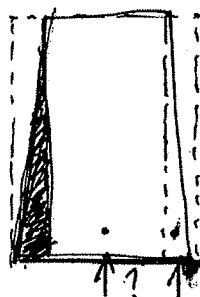
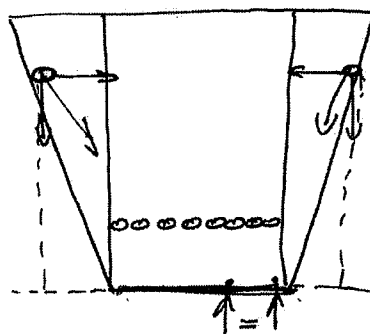
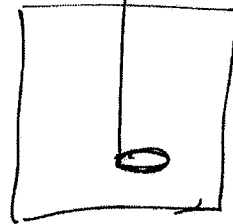
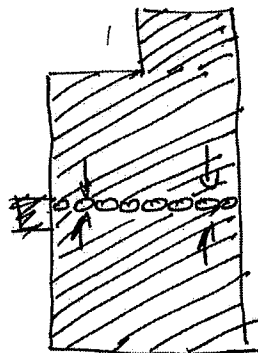
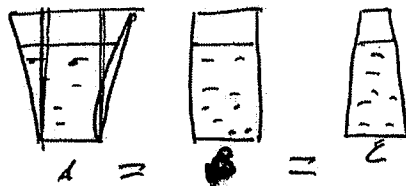
Ma 22 / 02 / 00. 14h

- A ∇

- B ∇

- C ∇

- A = B = C.



Débat 2

Groupe A 41, Mardi 22 Février 2000, 16h 15.

Récipients : a) $\backslash _ /$, b) $| _ |$, c) $/ _ \backslash$

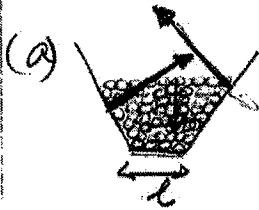
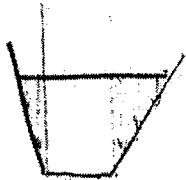
- 1A Tu vois la pression là...la pression, ça pousse sur les parois, ça veut dire que la pression, ici, elle sera moins grande dès qu'il y a une partie qui est perdue.
- 2B Non, pas moins grande, elle sera égale à celle...Si tu fais comme ça en disant que cette pression-là, elle s'applique sur les parois.
- 3A Ouais, mais y a quand même une partie...une partie qui s'appuie là, mais y a une partie qui va s'appliquer sur cette partie-ci, celle-ci. Initiale. C'est pas la même que là.
- 4A Pour moi j'sais pas, c'est celle-là la plus forte...
- 5B Celle-là la plus forte?? La troisième?
- 6A Non j'sais pas, non, non. Attends. Non, mais pour moi, c'est les trois les mêmes.
- 7B Ouais?...
- 8A En fait si tu les remplis de billes, y se passe quoi? Il se passe que...(...) Tu remplis ici, tu remplis là.
- 9B Quoi? Tu vas compter les billes?
- 10A Non, je vais pas compter le nombre de billes, attends!! Mais regarder comment s'appliquent les colonnes de pression...(...). Parce que là, en fait, t'as, dans le deuxième cas...
- 11B Combien de colonnes?
- 12A Mais, est-ce que les parois exercent des pressions sur ton liquide? Oui hein, sinon il s'étale.
- 13B Ouais.
- 14A Donc...pression de paroi.... Ici dans le deuxième cas, c'est facile. T'as que des pressions euh...verticales.
- 15B Oui là c'est cl...y a horizontale de la paroi...
- 16A Ben non!!...les pressions horizontales..
- 17B Ben oui. Si y a pas de pression là, ben ça s'échappe.
- 18A Une pression dans ce sens là?...Ah! Oui, oui,...pression ... plus pression horizontale...OK. Là y a pression verticale pression horizontale. Simplement,...
- 19B En, en fait la pression horizontale est plus forte, non? Dans le troisième cas... A la base, la pression horizontale va être plus forte là que là.
- 20A Horizontale...là que là?
- 21B Parce que là y a beaucoup d'eau. Là en bas, tandis qu'au dessus, y a peu d'eau
- 22A Et alors?
- 23B Il y a moins d'eau, donc la pression ici, il faut appliquer une très grosse pression.
- 24A Non, moi je dirais, ta pression hori..., ta pression verticale t'es d'accord...Ah, tu parles de la pression verticale?
- 25B Horizontale
- 26A Attends. Moi je dis que ta verticale, elle est plus forte en bas que en haut.
- 27B OK, on est d'accord
- 28A La pression horizontale, moi je dis qu'elle est plus grande en haut du récipient parce que en fait, c'est ta pression de paroi et euh, attends... bon ben dans le premier cas, qu'est-ce qu'on a? On a une pression ...
- 29B Horizontale.
- 30A La pression verticale...En fait c'est ça. Ta pression verticale, elle s'exerce aussi sur les parois du récipient vu qu'elles sont inclinées.

- 31B Elles sont obliques
- 32A Donc, t'as une pression verticale qui s'exerce dessus et t'as une pression horizontale de la paroi ou une pression, non, plutôt perpendiculaire, oui, c'est des pressions perpendiculaires...Ah mais voilà! Si t'as une pression perpendiculaire, ça veut dire que ça, ça pousse comme ça, ici dans le deuxième cas, c'est tout à fait horizontal, et dans le troisième, ça pousse un peu vers le bas aussi, si tu la décomposes en une horizontale et une verticale, eh ben, t'as une partie qui pousse vers le bas, c'est pour ça que tes pressions seraient euh, ...
- 33B Pour moi la pression, ça serait pas les mêmes. C'est pas les mêmes, je crois que je dis que c'est pas les mêmes.
- 34A Et quoi? Laquelle serait plus grande?
- 35B Je sais plus ce que j'ai réfléchi...j'y arrive pas en fait!
- 36A Moi, c'est cette explication-là que je vois la plus, pour moi la plus cohérente, enfin...
- 37B Ça fait que dans ton truc la pression est plus forte ici.
- 38A Ah non! Vu que....
- 39B Parce qu'il y a déjà toute la pression ici de la quantité d'eau, plus...
- 40A Oui, mais t'en as moins, dans le troisième. T'as moins d'eau au dessus que... dans le deuxième cas ou dans le premier cas. Vu que ta base, en fait ta base...c'est la même distance, quoi. Donc t'as plus, forcément, t'as plus d'eau dans le premier cas que dans le troisième cas. Mais comme une partie de la pression.. En fait, comme tes parois, les parois de ton récipient exercent des pressions obliques vers le haut et que... dans le troisième cas...
- 41B Moi je trouve que ...
- 44A les parois exercent une pression oblique vers le bas, à mon avis, ça revient au même.
- 45B Ouais, mais l'eau ? C'est les boules d'eau qui vont exercer une pression contre la paroi, ...
- 46A Oui, mais tu veux ta pression exercée sur le fond de ton récipient.
- 47B Pour toi, tout est la même chose?
- 48A Ouais.
- 49B Pour moi...je suis pas sure.
- 50A De toute façon, si on dit que c'est ça, que c'est pour ça qu'elles sont égales, c'est bien qu'ici ta pression verticale est plus forte que dans le cas... ça on va dire que c'est "a", ça "b", ça "c", donc elle serait plus forte qu'en "a" et qu'en "b" ... qu'en "c", pardon, qu'est ce que je raconte!plus forte qu'en "b" et qu'en "c", voilà.. Donc dans le cas "b", la pression verticale, comme ça, vers le bas voilà, la pression de tes boules, quoi, que t'en as plus...mais que ce serait compensé par euh... une pression des parois alors qu'ici dans le cas "b", ...
- 51B Il y a que, non il y a une pression verticale...
- 52A Il y a une pression verticale vers le bas qui serait comprise entre le cas "a" et le cas "c" et que oui y a des pressions horizontales qui n'entrent pas en jeu dans la pression verticale vu qu'elles sont perpendiculaires.
- 53B Moui...
- 54A (...) Et dans le cas "c" y a la pression verticale et il y a la pression horizontale...la pression verticale là de tes colonnes de billes est plus petite qu'en "a" et qu'en "b", vu qu'il y a moins d'eau, mais... la pression. En fait dans le premier il y a plus d'eau, ... dans le deuxième il y a moins d'eau, ...oblique, ...vers le bas. Je trouve ça logique, je comprends maintenant.
- 55P Ca va , tu as tout noté.
- 56A "c" = "b" = "a", voilà!

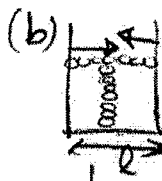
A91

Débat 2

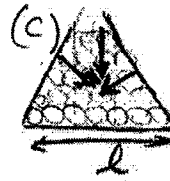
Ma 22/2/2000 16/15



pression vert.
+ p. horiz.



pression, vertic..
+ pression horiz.



pression verticale
+ p. horiz.

+ forte qu'en (b) et qu'en (c).

cas (b): pression verticale $(a) > (b) > (c)$.

la pression horizontale n'intervient pas
dans la pression verticale \downarrow car \perp

cas (c): la pression verticale $< (b) < (a)$.

Mais puisqu'il y a une "pression de parois"
oblique vers le bas la pression
verticale en (c) = (b) = (a).

Débat 3

Groupe B52 , Mercredi 23 Février 2000, 14H

Réceptifs : a) _ / , b) |_ | , c) /_ \

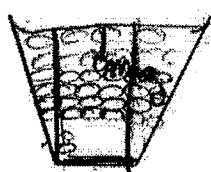
- 1A On va reprendre les feuilles qu'on avait la semaine dernière, comment on avait fait.
2B Moi, je crois, la force exercée sur....Chaque fond est le même...
3A Ouais, (brouhaha)
4A Moi, j'ai déjà mon idée de toute façon.
5B Quoi ?
6A Parce que chaque bille exerce une force avec son poids.
7B Et les billes exercent l'une sur l'autre...
8A Oui, de toute façon comme les fonds sont les mêmes,
9B Puisque y a chaque bille qui exerce une force.. égale à ça.
10A Au poids .
11B Au poids, donc euh...
12A Toute façon tu vois bien que...plus d'eau ici que là et là...
13B Non et entre ces deux là...dans le 1, y aura plus de petite billes, ça d'office, donc y aura plus de poids qui se mettront...
14A Donc pour moi c'est celui-là...
15B C'est juste celui-là.
16A Non mais, y rétrécit donc y a moins..
17B Oui, mais y faut qu'il y ait la même base au départ.
18A Ah oui oui d'accord
19B Parce que sinon, le calcul, il est pas bon.
20A Ah oui là c'est...peut être...
21B Alors on a ça, donc on voit que ceci ça va être moins parce que y aura quand même moins de boules dans celle-ci
22A Et pour vraiment voir lequel a plus de billes y faut des billes de la même taille dans chaque pot et après compter le nombre de boules.
23B Oui, mais tu connais pas la hauteur.
24A ...la même hauteur.
25B En tout cas ceux-là, c'est sûr que ça sera le même, hein, ça sera le plus grand, là d'office, (brouhaha) et il aura aussi ici euh... (brouhaha)....y aura plus de petites billes qui vont s'appuyer, oui celui-là c'est la plus grande force parce que y a plus de volume
26P Et de quoi dépendait la force exercée par une boule qui touche le fond ? De quoi dépend la force ?
27B Par le poids, par le poids de toutes les autres billes qui sont au dessus.
28P Qui sont juste au dessus, qui sont juste au dessus d'elle.
29B Juste au dessus d'elle... Ah ben donc y a juste..
30A (inaudible, parlent en même temps)
31B Ah oui mais attends, si tu considères que le fond, ça fait ça seulement.
32A Ah oui d'accord...
33B Et donc ça...
34P La boule qui est là, elle appuie...elle appuie pas sur le fond...
35A Ah, d'accord, ah..
36B Ca c'est la même chose que ça aussi.
37B 1 et 2, égal, puisque c'est que celle-là qui...

- 38A Oui mais celle-là, y en a moins.
- 39B Y en aura moins parce que pour que ça soit égal aux autres y devrait être comme ça, c'est pas le cas, quoi...
- 40A Parce que la force est identique
- 41B dans le 1 et dans le 2 parce que y a que les billes qui sont l'une au dessus de l'autre.
- 42A C'est ça, c'est vrai,
- 43B parce que les autres y appuient sur les parois et pas sur...
- 44A Oui, c'est vrai, ça...ça on n'avait pas compris...
- 45B Mais c'est quand même le 3 qu'a le moins, hein.
- 46A Ouais, c'est le 3 qui en a le moins.
- 47B 1 égale 2 plus grand que 3.
- 48A ...mes dessins, je veux bien que tu reportes
- 49B Allègrement !
- 50A ...dessiner les petites billes....
- 51B Faut toutes les dessiner ? (rire)
- 52A Moi je vais mettre ça en bleu...
- 53B C'est vrai qu'on n'avait pas pensé à ça, ça s'élargit.
- 54A Oui oui c'est sûr.
- 55B Parce qu'alors, c'est logique que ce soit la même chose que l'autre puisque, d'office
- 56A ...toutes les petites billes
- 57B C'est ça qui prend le plus de temps
- 58A Mais, en fait, on avait oublié de réfléchir à ça, que c'était que celle qui étaient au dessus...mais j'ai pas l'esprit physicien (...dessine). Moi j'aime bien, je préfère ça.
- 59B C'est plus agréable que la...on a toutes les billes..
- 60A Le problème c'est que les billes je suis sûre qu'elles n'ont pas la même taille, faudrait faire vraiment juste, compter le nombre de billes...
- 61B Mouais...(...) voilà, c'est pas si mal que ça.
- 62A Oui, je vais faire ça aussi comme ça, la partie où y a des forces exercées ...
- 63B ...où c'est égal, parce que sinon, on va plus rien comprendre Il faut bien les mettre l'une en dessus de l'autre parce que finalement ...
- 64A On n'aurait pas pensé à ça...oui mais...là...C'est ça, hein, ces billes exerçaient une force sur le fond.
- 65B Non, ... non, c'est comme ça.
- 66A Tu crois ?
- 67B Je crois.
- 68A Peut être qu'y vont exercer une force comme ça enfin j'sais pas.
- 69B Mais normalement celles-ci aussi.
- 70A Non, parce qu'elles n'atteignent pas le fond celles-ci.
- 71B Mais normalement tu devrais les avoir fait...
- 72A Non, mais là ça va pas parce que...Toute façon y en a moins.
- 73B (...) Si, faut quand même demander, parce que...
- 74A Tu vois si y a une bille ici, elles exercent avec leur propre poids une force, quand même.
- 75B C'est clair.
- 76A Son simple poids exerce une force...sauf d'accord qu'y a moins de force parce qu'y a moins de billes au dessus.
- 77B Regarde, en fait quand tu remontes, si je comprends bien ce système, ça va faire en fait...y a de moins en moins de billes qui exercent la force... mais y a de moins en moins de billes qui arrivent à toucher en bas, tu as raison. En fait, c'est la forme qui

- est...parce qu'y a de moins en moins de billes...qui arrivent au fond...
- 78A Mais dans celui-ci c'est différent parce que cette bille, elle exerce aussi une force sur le fond.
- 79P Oui, elle exerce une force sur le fond.
- 80A Bon.
- 81P Et quelles sont les autres forces qui s'exercent sur elle, sur cette bille-là ?
- 82B La paroi de côté.
- 83P Oui, mais la paroi...
- 84B On a moins de billes, de moins en moins de billes.
- 85P Oui, y a moins de billes donc...la colonne est moins haute...mais, la dernière, celle de dessus...qu'est-ce que fait la paroi sur la bille du dessus.
- 86B Ben elle exerce une force..
- 87P Elle exerce une force aussi ...un petit peu comme la main, sur le tas de boules.
- 88B Mm..donc...
- 89P Et qu'est-ce qu'on avait vu , la semaine dernière, en ce qui concerne toutes les billes qui se trouvent sur une même ligne horizontale ?
- 90B Elles ont les mêmes forces.
- 91P ...horizontales, et verticalement ?
- 92A C'est que le poids.
- 93P Si on se rappelle le fameux récipient là, hein, avec une partie qui était plus haute que l'autre, ... oui, c'est ça, alors ici qu'est-ce qui y avait en ce point là ?
- 94A C'était la force exercée par le piston moins la somme des poids.
- 95P Moins la somme des poids, jusque là, et cette différence c'était la force exercée par le plafond disons sur la dernière boule, et là, il y a une autre force exercée sur la dernière boule ? Laquelle des deux était la plus grande ?
- 96A Celle-ci.
- 97P Celle-là était la plus grande, donc...à cet endroit-là, la paroi exerce une force plus grande, donc si on prend ici le récipient incliné.
- 98B Mm, mm.
- 99P Là plus en bas, la paroi va exercer une force plus grande que là où on est plus haut.
- 100A Est-ce qu'on peut savoir si la pression exercée sur cette partie est plus grande, est plus petite dans celle-ci que dans celui-là ?
- 101P Non, ce qu'il faut retenir ici, c'est que, on a vu toute la semaine dernière, à un même niveau, la pression est la même donc les forces exercées sur les boules sont les mêmes, donc ici en bas pour toutes les boules ce sera exactement la même force. Et cette force elle est égale à la hauteur d'une colonne. Pour les boules qui sont ici, c'est la colonne plus la force que la paroi exerce ici.
- 102A On demande quand même ici, tout le fond...
- 103P Eh bien oui, donc le fond a la même surface, c'est le même nombre de boules dans tous les cas, donc au total ce sera la même force.
- 104B Moi j'aurais dit que 1 était égal à 2...
- 105A Donc la force exercée est la même dans les trois cas.
- 106P Oui.
- 107B Moi j'aurais dit que 1 était égal à 2, mais que 1 et 2 étaient plus grandes que 3.
- 108A Non, parce que... plus la paroi, y a la force de la paroi.
- 109B Mouais.
- 110A 1 égal à 2 égal à 3, quoi ! A cause de la force des parois.
- 111B Mouais...OK, y a une force exercée par les parois aussi.
- 112A Ca veut dire que 1 égal à 2 égal à 3. 113P Bon, voilà.

B52 Débat 3

Me 23-2-00 exp 1.1.
14h



①

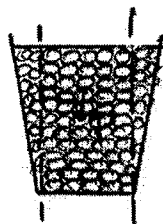


②



③

$$\textcircled{1} = \textcircled{2} > \textcircled{3}$$






$$\textcircled{1} = \textcircled{2} = \textcircled{3}$$

La force exercée sur le fond est la même pour les 3 récipients car il n'y a pas d'effet de la force exercée par la paroi

Débat 4

Groupe A11, Mercredi Février 200, 16h15

Ré cipients : a)  , b)  , c) 

- P ...les différents récipients, vous essayez de raisonner, on va faire ce qu'on a fait la fois dernière, il y a des lignes horizontales, il y a des lignes verticales, bon, à partir de ça raisonnez sur les forces que les petites boules qui sont en contact dans les récipients vont exercer sur ...
- 1A Toute façon, moi je dirais bêtement avec le poids, t'as plus de poids sur
- 2B ..les petites boules..
- 3A ...J'sais pas. Monsieur, y a la même quantité de liquide dedans, ou bien
- 4P La même hauteur.
- 5A La même hauteur.
- 6B Tu vois, si tu as les petites boules qui pèsent l'une sur l'autre suivant le modèle, quoi, ... ben ici t'as le même poids, au centre tu as les petites boules qui pèsent, à l'extérieur aussi, donc euh
- 7A Faudrait voir là des petites boules sur ...le plan incliné.
- 8B Oui, y restent sur le plan incliné en fait ...les premiers récipients ont le même euh, même poids sur euh...en fait.
- 9A Au centre.
- 10B Et puis y reste les deux triangles, les deux cônes d'eau, bon c'est pas des cônes...comment dire ? Y reste l'espèce de volume d'eau extérieur.
- 11A Et donc, si on prend une petite bille et qu'on..
- 12B Oui dans quel sens ?...ce sera toujours vertical.... Y a une réaction de la paroi, là.
- 13A Qui peut être que ...
- 14P On peut toujours décomposer cette force en une composante horizontale et une composante verticale . Si chaque fois que...des forces, on les décompose en verticale et horizontale de façon à revenir ...
- 15A Donc y a une ... qui compressera au centre et faut voir maintenant si c'est la direction vers le haut ... compense pas le poids de la petite bille.
- 16B Ben... ben oui dans un sens ça compense et dans l'autre.
- 17A Faut voir si ... mais comment on peut savoir ça ? Non mais, de toute façon, oui, la réaction peut pas être ... plus forte, enfin ..., y a pas de création d'énergie ici, si ça, ça compensait totalement le poids, y aurait aussi une force de l'autre côté et ça serait une création d'énergie, enfin, de force. D'office, ça doit être plus fort.
- 18b Mais attends, y a le poids des autres billes aussi, ...
- 19A Oui...Donc elles appuient toutes..
- 20B Les forces elles sont de plus en plus grandes au fur et à mesure qu'elles...
- 21B A la limite, on peut dire que, ça presse chaque fois sur euh...en diagonale
- 22A Ah oui en plus y a la réaction sur la boule d'en dessous
- 23A ...en diagonale. Donc ici, d'office, y aura une réaction.
- 24B Action réaction verticale ou horizontale ?
- 25A Y a une partie...qui sera verticale mais décomposée en parties ...toute façon, par l'expérience ...(Brouhaha). J'sais pas comment on peut l'attaquer, la force est là. (Brouhaha) ...vers l'intérieur. Ca c'est son poids mg...composante...dans l'axe.
- 26B Oui..
- 27A ..réaction, quoi...

- 28B Là c'est pas une réaction, c'est une action.
- 29A On va l'appeler A.
- 30B Ben donc ça donne quoi en bref ? Toutes les boules appuient verticalement sur la paroi, et comme y a une réaction de la paroi, ça dévie la force vers le centre ...
- 31A Mm mm
- 32B Et donc elle appuie sur euh ...
- 33A Mais, y a aussi une compression ...de l'eau ...
- 34B Ici ?
- 35A Oui, de l'autre côté, l'eau sera peut-être même plus concentrée ici, du coup, ...
- 36P ...plus concentrée, n'oubliez pas que l'eau est quasi incompressible, hein ?
- 37A Ah non ça ne marche pas parce que...
- 38B Si y a une force centripète, il faut quand même que...
- 39P Oh centripète, c'est pas... parce qu'y a pas mouvement, hein.
- 40A Enfin, y a une réaction des autres
- 41B radial, comme on dit...
- 42P ... tirer vers le centre ou....
- 43B Ben voilà...Donc, en fait, est-ce qu'on peut dire que toutes les boules exercent une force verticale ...
- 44P Oui.
- 45B Et à cause de la réaction de la paroi, la force devient ...
- 46A ...oblique.
- 47B ...oblique.
- 48A Y a une réaction vers le haut.
- 49P Oui, mais ce qu'y faut regarder, c'est toujours donc raisonner en terme de colonne verticale, ou ligne horizontale, alors ici, si je prends cette boule là par exemple, quelle est la force qu'elle exerce sur... sur le fond ?
- 50B Ben euh...les petites boules ...le poids.
- 51P Voilà, c'est ça. Maintenant, si je prends cette bille-là ?
- 52B C'est la somme...
- 53P Elle exerce une force sur quoi, cette bille-là ?
- 54A Un peu sur la paroi, un peu sur la bille du dessous..., enfin, ça dépend comment, ...
- 55P Oui mais, elle n'exerce pas une force sur le fond ?
- 56A Non, mais par l'intermédiaire de...
- 57P Quelles sont celles qui exercent une force sur le fond ?
- 58B Celles qui sont en contact avec le fond.
- 59P Oui., et alors quelle est la différence entre là et là ?
- 60A Y a une pression oblique.
- 61B Y a aucune différence en fait.
- 62P Y a aucune différence, oui, effectivement.
- 63B Y a une force exercée sur les boules du fond.
- 64P Chacune des boules qui sont sur le fond exercent une force qui est égale au poids de toute la colonne qui est au dessus.. ; celles qui sont là, forcément, elles n'exercent pas une force sur le fond, elles exercent une force sur la paroi, mais ici, la question qu'on pose, c'est la force exercée sur le fond.
- 65A Et, est-ce que elles n'appuieraient pas sur les petites billes juste en dessous ?
- 66P Ah ! Toutes les billes poussent l'une sur l'autre
- 67A Donc du coup, ça va se transmettre de toute façon à la petite bille ici...
- 68P ...bille ici, qui, elle, de toute façon, subira une force qui est égale au poids de toute la colonne qui est au dessus.

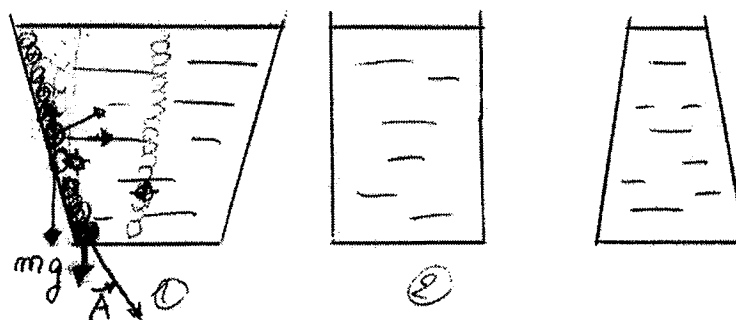
- 69A En plus
- 70P Ah non pas en plus. On a bien vu la semaine dernière que sur un plan, sur une ligne horizontale, toutes les forces sont les mêmes
- 71B Ca c'est vérifié, ça ? Que la pression ici est égale à celle-là, ça c'est vérifié expérimentalement ??? ..
- 72P Ah oui, la pression, elle ne varie qu'en fonction de la profondeur, hein, expérimentalement. La pression, elle ne varie qu'en fonction de la profondeur. Comme les hauteurs d'eau sont les mêmes, la pression ici doit être la même.
- 73A Ah oui, en fait, c'est si, si on avait pris une main, en dessous pour lever le truc c'aurait été plus difficile, juste à cause du poids du volume d'eau qui aurait été plus important.
- 74P Non, c'est parce qu'on considère toujours uniquement le poids de la colonne de billes qui est juste au dessus, c'est uniquement celui-là qui compte.
- 75B Y a pas de force horizontale ?
- 76P Oui, bien sûr qu'y a des forces horizontales. Les forces horizontales sont toutes les mêmes sur une même ligne horizontale.
- 77A Donc, c'est la même chose. Parce que, par expérience, je sais pas si je mettais là, ici et là..
- 78P Ah oui, la bille va exercer une force sur la paroi, qui sera perpendiculaire à la paroi, mais on peut la décomposer en une composante verticale...
- 79B Elle sera perpendiculaire ??
- 80P ...et une composante horizontale. On peut toujours décomposer une force suivant deux directions qui sont perpendiculaires.
- 81A (*marmonne*) Ah oui, ah oui, mais si, ah oui voilà ! Donc si on fait une composante verticale et horizontale, y a pas une composante oblique qui forcément ira toucher une bille du dessous.
- 82P Oui, mais les billes de toute façon, dans le modèle, elles touchent beaucoup d'autres billes, mais pour simplifier les choses, ça serait de dire que on va considérer uniquement les forces horizontales et les forces verticales, puisque on peut toujours décomposer une force suivant deux directions qui sont perpendiculaires l'une à l'autre.
- 83B Oui, m..., tout à l'heure, ces billes n'exercent aucune force...sur le fond, enfin, c'est quand même le poids qui agit, c'est la seule force qui agit...
- 84P Oui tout à fait..
- 85B C'est une force verticale, donc, elle s'exerce sur la paroi, et la paroi exerce une réaction perpendiculaire à, à, à la paroi.
- 86P Oui, la paroi, mais la réaction de la paroi, on peut la décomposer et y a une composante verticale qui retient les billes et une composante horizontale qui les comprime.
- 87A Je crois bêtement, expérimentalement, si on mettait sur la plaque b 10 billes, et qu'on mettait son doigt pour ...la dixième bille, on sentirait bien qu'y a un poids plus lourd qu'une bille toute seule...donc y a une pression...
- 88P Oui, le poids que tu vas supporter ici en dessous, ce sera l'équivalent de la colonne de toutes les billes ici.
- 89A Oui, je veux dire, mais si je prenais bêtement un plan incliné et que je mets même pas d'autre billes. Je mets juste mes billes sur le plan incliné. Je sais bien que si je mets mon doigt ce sera plus lourd que si j'en mets une bille, donc ça veut dire que ça exerce une pression...en dessous.
- 90P Bien entendu. La force est d'autant plus grande que la colonne est grande...

- 91A Et donc cette colonne s'ajoute à cette autre , et donc, y aura plus..
- 92P Ah non, pourquoi est-ce qu'elle se rajouterait ?
- 93A Vous êtes d'accord que c'est...
- 94P La bille qui se trouve ici, elle subit une force de celle du haut, une du bas et les latérales, si je les décompose comme ça. Donc la bille qui se trouve ici, c'est la même chose, une force venant du haut, une du bas, une de chaque côté. Et comme sur une même ligne horizontale, les forces sont les mêmes, la situation de cette bille-là n'est pas différente de celle-là, du moment qu'elles sont à la même hauteur.
- 95A Mais, y aura quand même plus de pression sur la surface, vu qu'y a, y a plus de billes.
- 96B Ah ben oui, c'est comme...
- 97P On, on va peut-être arrêter...

A 11

Débat 4

M_e 23/2/2000 16h15



Débat 5

Groupe A42, *Mardi 22 février 2000, 16h15.*

Trois étudiants : A, B, C.

Récipients : a) $\backslash _ /$, b) $| _ |$, c) $/ _ \backslash$

- 1A Bon, on va commencer. Bon, qui dit que les forces exercées ne sont pas les mêmes dans les trois tubes?
- 2B Moi
- 3A Toi tu dis ça
- 4B J'avais pensé que dans ce récipient là qui termine en forme de triangle [$/ _ \backslash$]... la pression était plus forte
- 5A OK et pourquoi?
- 6B Parce que tu vois, là, ça s'écrase... c'est compressé... la boule est compressée
- 7A Non mais pour moi ça serait l'inverse parce qu'ici, le poids de l'eau est moins important que si le truc est dans un triangle renversé [$\backslash _ /$]. (...)
- 8B Moi je trouve que c'est le même dans les trois... à une même hauteur de liquide correspond la même ...pression.
- 9A Ah...pas bête!
- 10C Ah! mais ça c'est trop simple... Tu vas pas chercher plus loin
- 11A Si justement tu vas chercher plus loin
- 12B Moi je pensais ça au début...mais...non
- 13Acomment nos profs... (...) que les trois trucs...on peut voir
- 14B Moi je pense comme Stéphane, y a plus d'eau,
- 15A Y a plus d'eau, sur un plus petit volume
- 16B Non, c'est le même volume d'eau
- 17A Non, c'est la même hauteur, c'est pas le même volume
- 18C C'est la même hauteur, c'est pas le même volume
- 19A On s'est posé la question déjà? (...)
- 19C C'est quoi la formule?
- 20A (...)
- 21C Ben tu vois si tu appliques... Y a des forces ...des deux côtés aussi d'ailleurs...La boule ici...celle du milieu elle la transmettait vers le bas vu qu'il y avait...
- 22A Oui, mais ce que tu vois c'est que... Y a une grande surface où il y a seulement la force de pesanteur qui agit et pas la force du verre
- 23C Oui, oui, oui, je sais bien qu'il n'y a pas la force du verre qui agit, mais
- 24A Si, si. Y a bien une force... de la part du verre
- 25C Réaction à la force..
- 26A Faut voir si cette force de réaction du verre est plus forte que la pesanteur... Pour moi en fait ça serait la même chose parce que les forces de réaction du verre, quand c'est en triangle, ça compense la force de gravité perdue
- 27C La force de gravité perdue
- 28B Non mais attends, tu dis clairement, c'est la même pression dans les trois
- 29A C'est la même pression dans les trois, ça pour être clair... mais bon, je peux me tromper évidemment
- 30B Non mais moi je pense pas comme vous
- 31A Bon, on a quand même vu quand c'était un truc... bon attends, s'il y a bien une réaction du verre, bon y réagit comme ça perpendiculaire peut-être et comme c'est

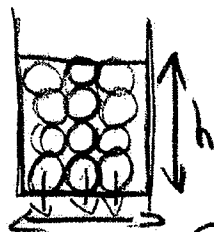
- réparti partout, la pression est la même pour moi
- 32B Ouais, mais en fait...
- 33A Quoique c'est vrai, comme d'un autre côté y a un plus volume d'eau donc un plus grand poids d'eau donc la force
- 34C Oui mais... la surface c'est toujours la même, donc c'est sur la surface que la pression elle agit, donc...
- 35B Attends...tends
- 36C la pression exercée sur le
- 37A Non, non sur le sol, sur le bas du bol
- 38C Donc le poids
- 39A Le poids, comme si...si le poids est plus important vu qu'il y a plus d'eau...parce qu'en fait, si ça c'est la même taille chaque fois
- 40B C'est toujours la même section
- 41A Donc, ça c'est plus grand, ici le volume d'eau est plus grand qu'ici qui est encore plus grand ici, le poids vu que la densité est la même...le poids est plus important, vu que c'est la même surface ...ici il y aura plus de pression, parce qu'en fait...ici il y a encore une pression là dessus
- 42C Ici il y a une pression qui s'exerce du fait que la paroi...non pas comme ça j'exagère... donc y a une perte...tout est rectiligne, perpendiculaire à la surface, mais ici Y a une certaine force qui se perd..
- 43A ...Oui mais...à partir d'ici pratiquement tu peux prendre la même chose comme ça, t'as quand même la même pression parce que t'as...
- 44C Ben oui ben c'est ce que je dis... tu as la même pression dans les trois récipients
- 45A Et quoi ici tu aurais la même pression parce que justement le verre exerce une force contraire...une force de réaction quoi
- 46C Une force de réaction sûrement mais qui compenserait par le fait qu'on aurait la même pression...puis à même hauteur de liquide on aurait la même pression sur une même surface.

Débat 6

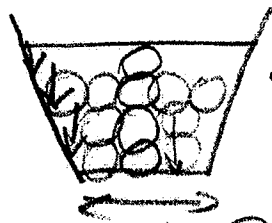
Groupe B14-3, 24 Février 2000, 14h.

Débat entre l'étudiant A et l'enseignant B, assistant à la séance.

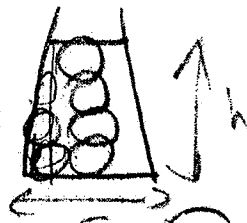
- A1 Bon donc tu disais...
- B2 Je dis la pression est la même partout parce que c'est la même hauteur et que c'est la même surface .
- A3 Donc ce qui compte, ce n'est pas la section du récipient au niveau de...la surface de liquide...
- B4 le poids de l'eau .
- A5 Ce qui compte, c'est la hauteur de liquide au-dessus de l'endroit où on calcule la pression donc, comme la hauteur est la même dans chacun des cas, la pression sera la même dans le fond de chaque récipient...bon ben après une réflexion un petit peu plus approfondie, on s'est dit que... le modèle des boules euh... explique très bien le fait que la pression augmente avec la hauteur de liquide mais, comment expliquer que la forme du récipient est indépendante...
- B6 que la pression est indépendante...
- A7 que la pression est indépendante de la forme du récipient...eh bien... avec le modèle des boules en mousse, nous, on a du mal à l'expliquer, mais bon, on va quand même essayer d'expliquer le fait que, par exemple dans le récipient de la forme d'un erlenmeyer, sur les boules qui sont.. sur la base du récipient quoi, mais aux extrémités, pas au milieu, bon, si on compte les boules au-dessus y en a moins donc on pourrait se dire...y a moins de pression à ce niveau-là mais en fait non, pourquoi...eh bien, parce que les boules ayant un certain poids, elles ont tendance à s'écraser donc à exercer une force latérale...horizontale sur les boules avoisinantes, cette force elle se transmet jusqu'aux parois et la paroi étant inclinée induit une force de résistance
- B8 de résistance
- A9 vers le bas
- B10 Oui, qui s'additionne avec les autres
- A11 et donc la force totale exercée sur la boule qui est vraiment à l'extrémité euh de la surface...de quoi.. du fond du récipient... et bien la force totale est exactement la même que celle qui est au milieu avec toutes les boules au-dessus, quoi....C'est ça...
- B12 Oui, oui, c'est ça
- A13 Voilà !



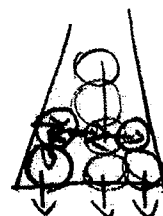
①



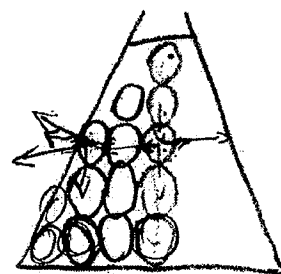
②



③



$$P = \frac{F}{S}$$



Débat 7

Groupe B14-4, 24 Février 2000, 14h.

A, B : étudiants ; P : professeur.

Récipients : a) _ / , b) | | , c) / \

(...)

A1 Faut pas oublier qu'on a des côtés...qu'on a des bords...

B2 J'allais dire, le poids y peut pas être homogène, enfin...en tout cas dans A et dans B il est peut-être homogène, mais alors les billes qui dans A, qui sont sur le côté, elles pèseraient sur.. ; enfin tu vois elles pèseraient sur les bords, mais elles n'auraient aucune influence sur la force qui s'applique ici sur le fond, par contre...

A3 Y a pas une histoire avec la surface.. euh...comparée au B par exemple, la surface du A est beaucoup plus grande et la surface du C est beaucoup plus petite...alors comme on a une surface qui est beaucoup plus petite, la force qui va être appliquée est plus petite...non ?

B4 Dans notre modèle, t'as juste des forces verticales et horizontales, t'as pas de force en diagonale.. enfin de biais. Ici tu considères que des forces verticales et horizontales, donc si tu prends le modèle au pied de la lettre, dans le c là...euh...tout ce qu'y a au-dessus de la surface applique euh sur .. le fond une force égale euh aux autres récipients, mais sur les bords de la surface euh du verre c, du bol c, eh ben y a moins de poids... donc déjà la force, c'est pas homogène sur le fond

A5 c'est pas homogène sur le fond pour le a et le c... pour le c, pourquoi ?

B6 Ben parce qu'il y a rien au-dessus...sur les bords du fond, y a pas autant d'eau qu'au milieu

A7 Ah oui, sur les côtés...dans les coins...

B8 Oui, oui, dans les coins, y a pas autant d'eau qu'au...qu'au milieu.

A9 Ah oui, sur les côtés, dans les coins.

B10 Y a pas autant d'eau.

A11 Ici la pression est la même, la pression...non, non, la force d'Archimède est la même enfin tu vois, j'sais pas enfin si on parlait de force...de force de réaction

B12 Là, (...) Ben oui, mais là tu vois si tu pousses plus fort, tu vas pousser plus fort sur celle-là, celle-là poussera plus fort sur la deuxième bille, la deuxième bille poussera plus fort sur la troisième, et puis en réaction le mur va pousser sur la dernière bille et ça va de nouveau tout retourner dans ta main... Y aura de toute façon un équilibre parce que le mur oppose une résistance égale à celle que tu ...à la force que tu exerces...Là dans le c, tu as toutes les billes qui poussent vers le bas ou vers le côté disons. Sur le côté, y a rien qui les empêchent.. enfin, c'est poussé vers le bas, et ce qui les retient...

A13 Elles auront du mal à remonter

B14 du mal à remonter ?

A16 non, pas à remonter, mais enfin je veux dire...

B17 à exercer une force vers le haut ? Non parce que t'as leur poids qui euh.. de fil en aiguille se répand vers le bas, et puis le fond il exerce la même force et il renvoie la force vers le haut c'est pour ça que c'est en équilibre, mais euh

A18 qu'est-ce que je vais marquer ici

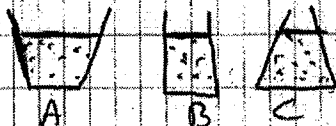
B19 C'était quoi la question ? Ah oui, où est-ce que la force est la plus grande ? Euh...

A20 Est-ce que la pression exercée...non c'était la pression... Est-ce que la pression

- exercée sur le fond des récipients
- B21 Ca revient au même puisque la surface est la même. Enfin, on va prendre ça...
- A22 est la même pour les trois ? Alors, la pression, pour moi la pression elle est...
- B23 prendre les trucs un par un, d'abord prendre le cas a et puis voir ce qui se passe, faire un grand dessin, parce que tu vois, on va devoir expliquer que là...ce qui est dans cette partie là, n'agit pas de la même manière sur le fond en fait euh (...)
- A24 Là alors ...
- B25 Non, non
- A26 Alors on va faire Faut commencer par le fond alors, tu vois si on a, si on a une bille comme ça, verticale ...
- B27 Celles-là, elles appuient vers le bas
- A28 Celles-là, elles appuient vers le bas
- B29 Tu vois si t'en mets, si t'en mets d'autre couleur ici, là, en partant du bas ou je sais pas comment, mais euh celles-là, elles appuient pas vraiment vers le bas, enfin si, elles appuient vraiment vers le bas, mais elles appuient pas sur le fond du récipient
- A30 Mais c'est partagé en même temps sur le bord, sur le côté, et en même temps sur...horizontalement, tu vois ce que je veux dire ?
- B31 Euh ... elles poussent, elles poussent vers le bas. Ben dis donc, dans le modèle, on n'a pas envisagé comment réagissaient les forces quand le plan était pas perpendiculaire au...à la ... tu vois. Ici dans le modèle qu'on a utilisé...tous les... ce plan là, il est perpendiculaire à la force.
- P32 Oui, oui, c'est ça
- B33 Oui mais ici c'est jamais le cas
- P34 Oui mais on peut à ce moment là...la force sera toujours perpendiculaire au plan, mais on peut à ce moment-à la décomposer en composante verticale et en composante horizontale
- A35 verticale et en composante horizontale
- P36 Donc tu as dessiné là des boules en vert et des boules en rouge qu'est-ce que.. .quelle est la différence entre...
- A37 Ben celles en rouge, elles sont...elles appuient pas directement sur le centre
- P37 Voilà, elles appuient sur la paroi latérale...qu'est-ce que tu en conclus alors ?
- A38 Ben, alors, que ça reviendra au même.
- P39 Que...que dans quel cas ?
- A40 que dans le cas b
- P41 Donc le cas a et le cas b sont les mêmes...alors il reste le cas c
- A42 On a donc marqué ça...les billes en rouge euh, exercent une force sur la paroi et donc pas directement...
- B43 Pas directement ou pas du tout? Parce que après il va falloir dire si la pression est la même sur le fond de a et de b. Si c'est pas directement, c'est qu'y a quand même une influence sur le fond, donc la force risque d'être différente
- A44 Je voudrais pas dire pas du tout.
- B45 Ouais (rire)
- A46 Donc on en déduit que a est égal à b , p_a égale à p_b donc le a on l'élimine et on fait le cas c. En fait c'est un peu l'inverse que le cas a...et donc là on aura uniquement les boules ici, qui vont jouer...en plus...
- B47 Mais ce qui y a...ce que tu es en train de dessiner ...en vert...là la pression sera la même partout mais ici elle va devenir de moins en moins forte, non ?
- A48 Elle va diminuer, ouais... voilà... et là on aura donc...là c'est la même chose que b parce que des boules rouges qui n'exercent pas directement sur...tandis qu'ici on a

- des trucs en plus.
- B49 Non, c'est pas qu'on a des trucs en plus, c'est que le fond est plus grand que, que la surface, donc la pression diminue. Vu la forme du verre, elle diminue progressivement, en tout cas sur les bords..
- A50 Oui mais au départ on a quand même là regarde, ça c'est égal à b , d'accord, donc on a quelque chose en plus, sur le côté
- B51 Attends, redis un peu...au mieux c'est égal à b
- A52 Non, non regarde, le fond est égal à b , vu que les fonds sont tous les trois égaux donc, en fait, on a mal fait notre dessin
- B53 Oui on a mal fait notre dessin, mais c'est pas grave
- A54 Non, non attends, je veux que ce soit bien la même chose. Donc on a pris un deux trois...là c'est le fond le même, ... et en fait on a ... non, non, tu vois pour avoir en b il faudrait avoir un équilibre, tu vois, la même chose que b ...il faudrait ça, tu vois ce que je veux dire, on n'a pas ça
- B55 Donc ... à partir du moment où tu as dépassé la surface...non, non pas quand on descend...à partir du moment où on est sorti de la surface
- A56 sur les côtés quoi, comme ça...là, c'est la même qu'en b ...donc c va être plus petit que b
- P57 Pourquoi ?
- B58 Non, non la pression, tout ce qui est vert sera la même
- P59 Oui
- B60 et ici elle va diminuer progressivement
- P61 Et pourquoi est-ce qu'elle va diminuer progressivement ?
- B62 parce qu'il y a moins de boules qui pèsent...
- P63 Oui, y a moins de boules qui pèsent, mais qu'est-ce qu'il y a au-dessus de la dernière boule ?
- A64 La paroi.
- P65 La paroi qui pousse...sur la dernière boule
- B66 Elle pousse ?
- A67 Ah! oui, elle
- P68 On peut toujours...la paroi...elle va exercer une force sur la paroi, qui est perpendiculaire.. et on peut toujours la décomposer en une force verticale et une force horizontale, donc la paroi ici, elle va pousser les boules vers le bas, un petit peu comme la main qui poussait sur le sommet des boules... et qu'est-ce qu'on peut dire alors pour toute cette série de boules ici, qui se trouvent au même niveau ?
- A69 au même niveau, mais la pression est la même.
- P70 La force est la même, donc par conséquent ?
- A71 La pression est la même
- P72 La pression sera la même.

- Est-ce que la pression exercée sur le fond des récipients est la même pour les 3 ?



- On a le poids des billes ^{de} liquide qui repose sur le fond du récipient.

• cas A :



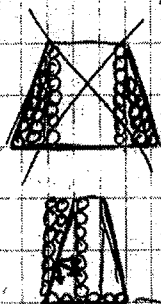
- Les billes en rouge exercent une force sur la paroi et donc pas directement sur le fond.

Donc en ^{du fait} déduire :

$$A = B$$

$$P_A = P_B$$

• cas C :



- Le fond est plus grand que la surface la pression diminue quand on descend vers le bas sur les côtés

• Comme la ^{paroi} ~~surface~~ exerce une force perpendiculaire sur les billes, les billes (par ex.) au fond ^à sur une même profondeur ont une même force donc on aura une même pression pour toutes ces billes et comme le fond des 3 récipients ont une même ~~surface~~ ^{surface} on peut dire que les 3 forces seront égales

$$\Rightarrow P_A = P_B = P_C$$

Débat 8

Groupe B14-2, 24 Février 2000, 16h15

A, B : étudiants ; P : professeur.

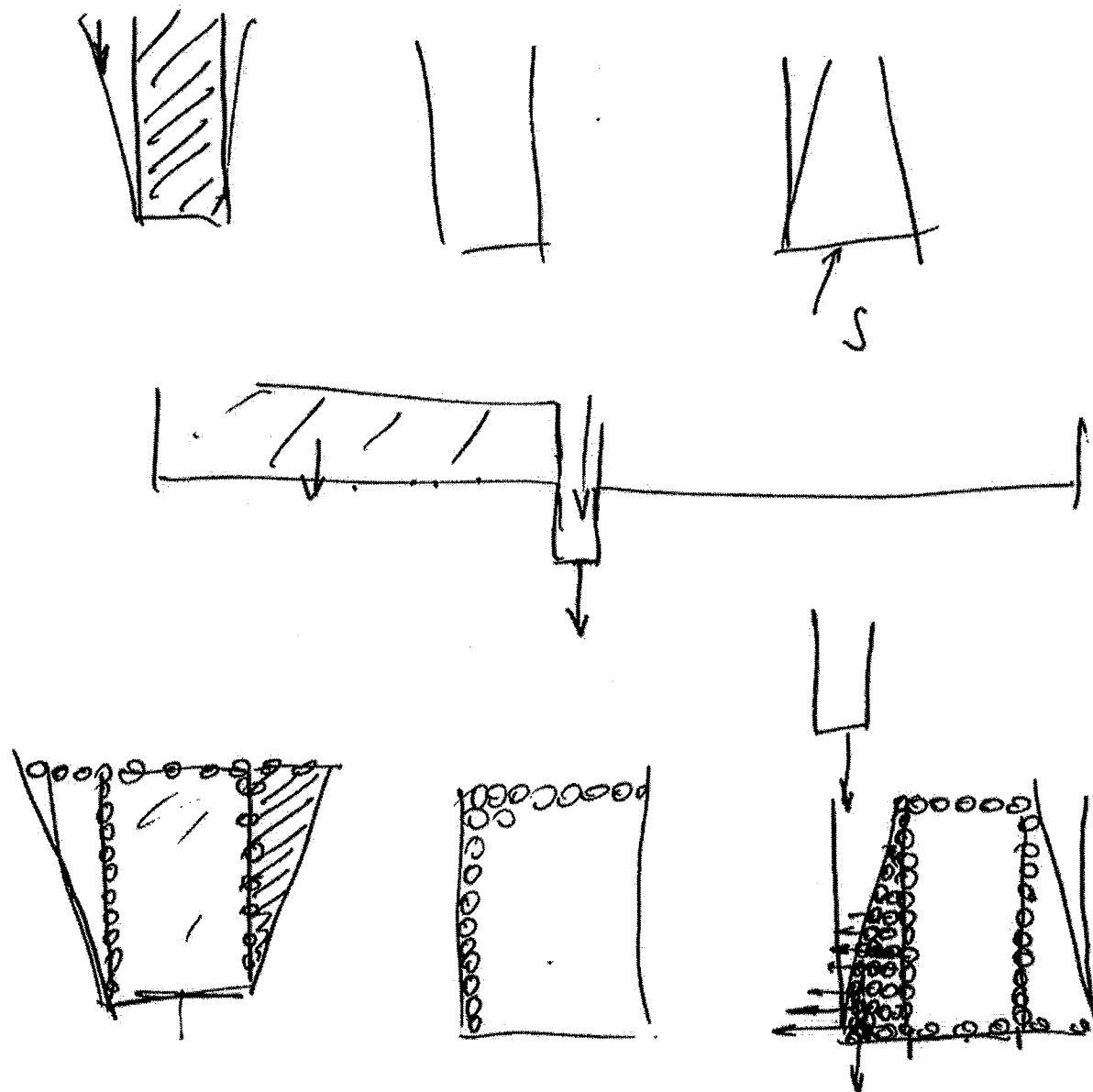
Récipients : a)  , b)  , c) 

- A1 La pression et la force c'est la même chose.. dans les trois récipients t'as une même surface. La pression, c'est la force sur la surface, donc si la pression est la même, la force est la même.
- B2 Moi je ne crois pas.
- A3 Mais si mais si. Attends, tes trois récipients ils ont, ils ont ...comment veux-tu faire autrement ? Tu vois ce que je veux dire...t'as trois récipients, ils ont la même surface,
- B4 ils ont la même surface, seulement...
- A5 et tu dis, ... attends, vas-y !
- B6 Pour moi, l'évasé, euh! la force, je parle pas de la pression, la force exercée sur le fond est plus grande parce qu'y a plus de liquide. Il y a un plus grand poids.
- A7 Imagine si t'avais un récipient, un truc comme ça, est-ce que t'imagines que la force ici serait plus importante que si t'avais un truc comme ça ?
- B8 la force, elle sera pas plus importante
- A9 Pourquoi ?
- B10 Parce que le liquide qu'y a ici, le liquide qu'y a ici, y va appuyer là-dessus, uniquement, qu'est-ce qui va appuyer ici, c'est là qu'on va en venir au modèle des boules, qu'est-ce qui va appuyer ici, c'est uniquement cette colonne d'eau, c'est elle qui va faire une force ici, donc la force sera la même que là, tu vois ce que je veux dire ? Donc ta pression aussi parce que cette paroi-là, cette, cette surface-là elle va pas éclater. Comme celle-là, si celle-là n'éclate pas elle n'éclatera pas non plus, tu vois ? Parce que qu'est-ce qui agit sur cette surface ici, c'est uniquement la colonne d'eau qui est située au-dessus, parce que tout le reste agit ici, et si tu veux, dans le cas où t'as ton truc, où t'as plus d'eau, ça n'a aucune importance parce que toute l'eau que t'as ici elle va exercer une force sur la paroi. A la limite ce qui pourrait arriver, c'est que ton truc se casse comme ça, quoi.
- A11 Oui, ça d'accord ! Là t'as raison
- B12 Par contre, il faut se poser la question ici parce que là t'as moins d'eau et si tu prends la colonne, ben là t'as un vide. Parce qu'on avait fait ce raisonnement là, là c'est bon parce que l'eau qu'y a ici agit sur ces parois-là, mais là y a un manque d'eau, là, tu vois. Donc la force ou la pression devrait être moins forte ici.
- A13 Mouais, mais c'est pas le cas
- B14 C'est pas le cas parce que la pression... Attends, ce qu'on peut essayer de faire c'est quand même de faire ça à partir du modèle...
- A15 Avec les boules !
- B16 Parce que...Attends, attends... Imagine, dans celui-là... On va faire ça voilà, alors si tu mets...tes boules ici...t'en as autant ici, hop hop hop hop hop hop hop, hop hop hop hop hop
- A17 Attends
- B18 Alors qu'est ce qu'on va faire ? C'est pas simple hein, c'est pas facile, parce que...Attends ici c'est évident quoi t'as ce volume d'eau là, en fait t'as tout le poids

- de l'eau qui s'exerce sur cette surface, alors qu'ici...qu'est-ce que t'en penses ?
- A19 ...en fait tout le poids, tout le poids que t'as ici faut voir où est-ce qu'y va. Le poids de cette eau-là, faut voir où est-ce qu'y va s'exercer quoi.
- B20 mmm, Y va s'exercer sur les flancs.
- A21 Ici t'as un autre problème
- P22 Donc, ici qu'est-ce que tu dis pour, euh, ces deux-là ?
- B23 Ben euh moi je dis qu'ils sont tous les trois la même chose.
- P24 Oui, et pourquoi ?
- B25 Pourquoi ? Donc ici on arrive bien à expliquer par le fait qu'ici on a toute cette colonne d'eau qui s'exerce sur la surface, bon la surface est la même déjà, et... ici, on a expliqué ça de la façon suivante c'est que ici toute cette colonne d'eau, tout le poids de cette colonne d'eau va s'exercer sur la surface donc il y aura la même force, et toute l'eau qu'on a sur les bords va s'exercer sur les parois. Ce qui pourrait se passer c'est que les parois explosent...
- P26 Alors reste à expliquer celui-là, mais ça c'est correct.
- B27 Alors ici...
- A28 T'as pas une idée ?
- B29 On va déjà dessiner la colonne, comme ça...
- A30 Là tu vois, c'est dans le cas, tu vois parce qu'on avait vu, la fois passée, d'une manière, on pousse vers le plafond, et l'autre, on la pousse vers le fond, et ça c'est le premier cas, on va reprendre et le troisième c'est..
- B31 Ah oui ! Oui ! Tout à fait, oui, oui, oui
- A32 L'eau qu'y a ici, en fait, l'eau qu'y a ici, ta paroi va avoir une pression comme ça et c'est ça qui va faire la pression vers le bas aussi, mais euh attends
- B33 Et si je me rappelle bien c'était ... le poids... la force exercée sur...euh...sur le plafond ...oui mais en fait c'est... oui, en fait on avait vu un moment aussi que dans le cas du liquide...euh, je veux dire quand tu prends une boule ou une molécule isolée, elle va subir et ou exercer une force égale dans les quatre directions, c'est ça qu'on avait vu aussi ... n'importe où, dans les trois directions donc ce qu'on a ici c'est, c'est que ces billes-là elles subissent une pression comme ça, donc elles vont exercer une pression sur la paroi...OK...plus ou moins forte, en fait, elle sera plus importante ici, mais ce qu'y a c'est que, du fait qu'elles reçoivent une pression comme ça, elles vont aussi exercer une pression comme ça
- A34 Ah!, je me rappelle, oui, oui, quand t'avais, on avait pris un petit rectangle
- B35 C'est avec le truc, on avait pris un petit rectangle, c'était la poussée d'Archimède
- A36 Oui, oui, c'est ça !
- B37 On pourrait essayer de suivre le même genre de raisonnement en...
- A38 La force d'Archimède intervient là-dedans...
- B39 Ben oui, mais la force d'Archimède c'est le... ben pas en tant que telle parce que la force d'Archimède c'est le fait que, quand tu trempe un corps, t'as le poids du volume d'eau déplacé qui...mais en fait ici t'as ton liquide homogène donc t'as pas ce problème-là à se poser, mais à mon avis c'est bêtement ça quoi, mais, enfin, disons, dans l'état actuel des choses on se rend compte que t'as une pression exercée à partir de ces parois-là, quoi...maintenant y faut essayer de le quantifier et de se demander si oui ou non on va arriver à la même pression qu'ici
- A40 Oui en fait, pour moi le dessin il est faux
- B41 Oui ?
- A42 Parce qu'ici, ...ça, c'est ça. Ce qui fait que si tu veux dessiner ce carré là, il faut pas le dessiner à l'intérieur, il faut le dessiner dehors

- B43 Oui, oui d'accord, tu veux dire le...ton second récipient que t'as ici... Enfin là on a réussi à sentir le truc mais pour quantifier...
- P44 Et qu'est-ce que tu as senti ?
- B45 On a senti en fait que ici, déjà, on a cette colonne d'eau qui s'exerce sur la surface..
- P46 Tout à fait...
- B47 Donc, localement, la pression est la même qu'ici, ...pour ce qui est d'ici, on a suivi le même chemin de raisonnement que dans le cas où on avait fait un récipient complexe la dernière fois et... on a en fait...ces billes-là exercent une pression sur les bords ici sur ces billes-là, plus ou moins importante selon la hauteur, et de ce fait-là...Ah ben oui ! C'est bon ! Parce que de ce fait là, comme les molécules exercent ...si elles reçoivent une pression d'un côté elles exercent les mêmes dans les trois dimensions, en fait la pression va être exercée...on va avoir la même pression exercée vers le bas aussi.
- P48 Tout à fait
- B49 Comme c'est la même pression en fonction de l'altitude...
- P50 Ca va... OK

B 14/2 Débat 8 Jeudi 27/2/2000 16h15



Débat 9

Série B22, Mardi 22 février 2000, 14 heures, 15 min

A : étudiant, B : étudiant, P : professeur.

Récipients : a)  , b)  , c) 

- A1 de toute façon la hauteur dans les deux bacs, dans les trois bacs c'est la même chose.
B1 oui, c'est la même chose.
A oui, de toute façon la pression augmente avec la hauteur mais ici comme la hauteur est pareille, il n'y en a pas.
B2 oui, comme il y a la même pression chaque fois dans une colonne, dans une ligne oui
A3 oui, donc dans les lignes horizontales, là c'est pareil, la seule chose c'est les formes qui changent. Dans le premier, elle est
B3 en fait le premier le volume 1 peut convenir dans l'énoncé
A4 parce que regarde aussi, on cherche la force exercée sur le fond du récipient
B4 du récipient, oui
A5 et le fond, c'est cela
B5 mais en fait la distance de leur fond varie
A6 non
B6 elle est égale. Ah, oui
A7 Les trois fonds sont égaux, donc de toute façon le premier et le dernier pour moi c'est pareil. Sur le fond, on a la même pression. A moins que les billes qui sont sur le côté poussent aussi. Mais non, même si elles poussent comme cela, les autres qui sont de l'autre côté
B7 non mais le fait qu'elles sont là, c'est quand même que c'est différent
A8 non mais sur le fond
B8 ah! oui sur le fond, oui directement sur le fond à mon avis elles n'ont pas d'allez, d'actions enfin je sais pas comment on dit
A9 je crois pas
B9 n'ont pas de pouvoir de
A10 je crois pas. Par contre si tu veux ici comme les... sur le deuxième
B10 celles-là elles sont sur le fond
A11 oui, voilà. Comme les parois.
B11 à mon avis, il y a plus de pression dans celle là, dans la b que dans la a.
A12 Mais non justement,
B12 Mais non tu as les parois comme ça et tout.
A13 Mais oui, si les parois sont comme cela. Regarde, ici les petites billes d'eau ce sera dans le coin. Il n'y aura pas, il n'y a pas une colonne d'eau au-dessus. Il y a juste la paroi et une bille dans le coin
B13 oui mais elle, la bille, cette bille là, elle pousse toute seule contre la paroi, il n'y a pas une autre bille qui repousse pour que ce soit équivalent, tu vois
A14 oui d'accord justement la pression elle augmente avec le poids de l'eau qui est au-dessus. Mais ici, il n'y a pas de poids au-dessus. Tu vois? Ici, il n'y en a pas, donc pourquoi ici la pression elle est plus basse, elle est plus petite là aussi,
P1 sur cette partie là?
A15 Et au centre là, ça c'est la même qu'on a pas retrouvé là. Et alors maintenant, il reste à voir ici. Tu sais à mon avis je me demande si elle n'est pas plus grande

- B15 en a ?
- A16 Attends. Non; Plus petite que le premier, ça c'est pas possible
- B16 Non c'est
- A17 C'est ça le problème
- B17 Non c'est, tu t'es gourée, c'est plus grand. Egale dans les trois
- A18 ah! oui, oui, oui
- B18 et plus grand dans le premier, plus grand dans le deuxième
- A19 Je me demande c'est pas plus grand dans le a ? Parce que de toute façon dans le b c'est bon. Parce que regarde en fait. Bon ici regarde, je fais cela comme ça. Tac, ça on retrouve ce truc là. D'accord, donc déjà là. Mais on a en plus des billes à côté. D'accord? qui poussent ...
- B19 Est-ce que tu crois que le volume de l'eau, cela change quelque chose? Parce que quand tu regardes, je vais te refaire le dessin avec les bonnes proportions à la base, et donc le volume le plus grand c'est d'abord le 1, puis le b et puis le c ,
- A20 oui
- B20 donc si le volume a une importance, alors c'est le 1 qui est privilégié, le b qui... On l'avait refait l'autre fois ce calcul là. Donc
- A21 ça nous avance à rien. La pression c'est la force sur la surface. Donc en fait ici la seule chose c'est que le A et le B on retrouve la forme du C dans le A mais ici on a des billes d'eau en plus sur les côtés
- P2 Alors pourquoi est-ce que cela ne change rien?
- A22 Le tout c'est de savoir si ça change ou si ça ne bouge pas
- P3 Exactement.
- A23 c'est autre chose
- P4 Donc qu'est-ce qu'il faut faire?
- A24 Ici en ligne cela ne change pas. La pression elle est constante en ligne horizontale. La pression change avec ... enfin
- P5 Qu'est-ce qui pose un problème ? Pourquoi est-ce qu'on ne peut pas dire... pourquoi tout de suite a priori on peut pas dire que la force va être la même?
- A25 C'est juste voir si ces billes-ci sur les côtés changent la pression sur la surface
- P6 C'est ça l'enjeu. Et alors?
- A26 Le fait qu'elles ne soient pas ici, est-ce que cela change quelque chose avec..
- P7 Voilà
- A27 C'est ça que... c'est difficile à savoir.
- P8 Bon ben à ce moment là, c'est déjà une bonne chose. C'est que tu as compris ce qu'il fallait résoudre comme problème. Maintenant ce qu'il faut faire c'est de regarder simplement localement ce qui va se passer. Parce que t'es d'accord que si, si je sais ce qui se passe ici, comme on a vu la semaine dernière que ça se transmettait sur...
- A28 On sait comme cela va se propager et on sait la réaction que cela va avoir
- P9 Voilà donc il faut que tu regardes localement ce qui se passe. Donc ce qui est intéressant, c'est au niveau de la paroi, dans les deux configurations ce qui se passe (en chœur). Ce que je te conseille, c'est de regarder juste à l'angle... représenter simplement trois balles de mousse et faire un bilan de force et montrer... qu'est-ce que tu dois montrer finalement?
- A29 Simplement voir si les parois sont... Si ça s'allume pas non. Faut voir quoi s'il y a une force qui va être résultante.
- B21 qui en résulte
- A30 voilà
- P10 Qu'est-ce qu'il faut montrer ici en fait, ici? Du point de vue de ces deux forces là, ces

- forces de contact, qu'est ce qu'il faudrait montrer dans ce cas là?
- A31 Euh, montrer que cela n'a pas d'interaction. Enfin si, mais que la résultante est nulle. Et que cela ne va pas changer la pression exercée par cette colonne d'eau là.
- P11 Ici, [réipient $c / _ \backslash$] la différence avec le cadre A [$_ \backslash$], le problème c'est l'absence de balle au-dessus, dans ce cas là. Il faut montrer que cette absence ne change strictement rien au cas droit où, effectivement, j'ai deux balles sur chaque, et là c'est assez clair, donc il faut que/
- A32 Ah! En fait la paroi ici exerce la même pression que celle-là exerce sur celle là.
- P12 Si j'ai une configuration comme cela, comment est la pression à ces deux endroits?
- A33 ici?
- P13 oui
- A34 C'est la pression qui est exercée par la hauteur... enfin la masse des deux, de mes deux boules qui sont celle là et celle là
- P14 Oui d'accord
- A35 Ici, la pression, c'est clair, c'est ces deux là mais ici la pression elle va être exercée par la masse de celle-ci plus la paroi et donc la pression de la paroi devra être égale à la pression exercée à une pression exercée par une petite bille
- P15 Voilà, donc ça, il faut que tu le montres
- A36 Et oui... mais comment?
- P16 Ben tu fais un bilan de forces, tu dessines les forces qui s'exercent sur celle-là
- A37 OK
- P17 Et mets bien en évidence ce qui dans le modèle permet d'avoir, permet que la paroi transmette... enfin si tu veux ce qu'il faut montrer c'est qu'effectivement la force qui pousse la paroi/
- A38 C'est exactement la même que la force exercée par une petite colonne d'eau
- P18 Voilà
- A39 OK. Faut-faire cela?
- P19 Vas-y, fais-moi le bilan de forces
- A 40 Comme on est en statique, la somme des forces, c'est égale à zéro, donc j'ai le poids de ma colonne d'eau plus la force de contact exercée par le fond de mon récipient sur la colonne, et ... c'est la force, la réaction de l'action.

Interruption du magnétophone

- A41 Alors on fait un bilan de forces donc le poids de ces deux balles là avec la force de contact du plomb sur la balle, j'ai un F_1 et un A prime qui sont tous les deux égaux parce que c'est action réaction.
- P20 mais là c'est pas sur cette balle là, c'est sur quelle balle que tu fais le bilan?
- A42 Sur celle-là
- P21 Oui
- A43 Sur celle ci. Et si je fais avec les quatre, c'est pareil, j'obtiens exactement la même somme, en fait le fait qu'il y ait une balle ici au-dessus n'influence pas sur celle-là, quoi
- B22 il y a le poids
- A44 Le poids mais le poids il agit là verticalement, il n'agit pas sur celle-ci
- P22 Si, on vient d'expliquer la chose
- A45 Il se... en fait, il se propage aussi
- P23 Ici effectivement dans le cas droit, tu as
- A45 Eh, j'ai des problèmes avec ces trucs, moi.

- P24 Dans ce cas-là, effectivement l'intensité de la force est la même puisque l'on a ...
chacune des balles supportent le même poids. Oui? D'accord? Donc en fait, la force,
l'interaction entre le fond et la dernière balle correspond à son propre poids plus le
poids de toutes les autres balles
- A46 qui sont au-dessus
- P25 donc on est d'accord que partout sur le fond j'ai la même pression
- A47 Oui
- P26 Donc ces deux balles là subissent
- A48 la même force
- P27 la même force. OK. Et maintenant ici, qu'est-ce qui explique, bien qu'il n'y ait pas de
balle au-dessus de celle/
- A49 c'est la paroi
- P28 Et la paroi... Et pourquoi est-ce que la paroi?
- A50 *Incompréhensible*
- P29 C'est comme effectivement ce cas là
- A51 puisque si on avait que P2 plus toute la colonne qui était là, ben ici P2 à la limite il
n'en a pas quoi donc c'est le même que celui au-dessus et donc c'est P2 plus le poids de
la colonne fixe, donc d'office la pression ici cela sera égale au poids de ceci, donc on
n'a pas besoin d'avoir des balles là au-dessus
- P30 Oui mais qu'est-ce qui physiquement permet d'avoir dans ce cas-là hein, dans cette
configuration-là qu'est ce qui physiquement permet d'expliquer que l'intensité est la
même là et là? Quelle est la force ?
- A52 La force de contact
- P31 La force de contact paroi-balle, pourquoi, parce qu'elle est en oblique et donc et donc
il y a une composante verticale
- A53 Ah! perpendiculaire qui est égale au poids des balles
- P32 qui correspond au poids de cette balle
- A54 Ah! oui
- P33 Parce que ce poids là est transmis, parce que c'est une balle de mousse, elle ne se
déforme pas, mais elle transmet la force qu'elle subit, verticalement elle la transmet,
horizontalement à ses voisines et ses voisines, celle qui est contre la paroi transmet
cette même force
- A55 à la paroi mais
- P34 à la paroi
- A56 et la paroi lui renvoie
- P35 et la paroi lui renvoie par le principe d'action. Tu peux faire ça dans ce cas là, dans le
cas convexe, tu peux le faire oui voilà avec un angle obtus.
- A56 Oui donc finalement c'est ce que ...
- P36 Et donc si tu prends ce cas là, si tu prends le cas avec un angle obtus, dans quel sens
est dirigé la force?
- A57 Comme cela
- P37 Voilà, essaies de refaire à côté ici le même raisonnement mais pour l'angle obtus.

Résumé

Cette thèse comporte: une étude des raisonnements des apprenants sur les fluides ; l'élaboration, l'expérimentation et l'évaluation d'une séquence d'enseignement sur la statique des liquides en présence de gravité, les aspects cinétiques et thermiques étant exclus. Elle présente une analyse des recherches d'autres auteurs sur ces sujets et quelques idées guides sur les raisonnements impliqués dans ce contexte. L'analyse du contenu et l'étude des conceptions sont envisagés de façon étroitement liée.

Après deux entretiens exploratoires, la recherche sur les raisonnements est faite au moyen de plusieurs questionnaires, aux niveaux du lycée et de la première année universitaire. Un point critique est la difficulté à connecter les actions locales et les effets globaux, ce qui demande un raisonnement systémique, capable de rendre compte du *mécanisme* qui permet d'établir la situation finale d'équilibre.

La courte séquence d'enseignement, expérimentée chez des étudiants de première année universitaire, est basée sur la proposition d'un modèle mécanique simple de liquide, au niveau *mésoscopique*, dont les éléments sont des balles de mousse. Le but est de rendre concrète et visuelle la décomposition typique en mécanique des fluides, en évoquant des objets avec lesquels établir une analogie de comportement. L'attention est posée sur les interactions locales et sur la transmission des changements, pour aider les étudiants à surmonter leur difficulté à concilier les lois formelles et le comportement local du fluide. L'évaluation de la séquence se fonde sur: des pre-tests et des post-tests, sous forme de questionnaires papier-crayon, comparés avec les résultats de groupes témoins ayant suivi un cours "classique" ; des enregistrements audio des débats entre étudiants lors de la séance finale. Les réactions d'un groupe d'enseignants en formation sont reportées, concernant une éventuelle reprise de la séquence.

Quelques lignes de développement ultérieur de la recherche sont données.

Abstract

This thesis presents: a study of the forms of reasoning learners apply when dealing with fluids; the design, experimentation and evaluation of a teaching sequence on the statics of fluids in the presence of gravity, kinetic and thermic aspects excluded. It contains an analysis of previous research on this topic by other authors; and some guiding ideas on the reasoning involved in this context. Content analysis and the study of conceptions are linked throughout.

Besides two preliminary interviews, the research on reasoning involves several questionnaires put to high-school and first-year university students. One crucial point is a difficulty in connecting local actions and global effects; this requires a systemic form of reasoning, to explain the *mechanism* establishing the final situation of equilibrium.

The short teaching sequence experimented among first-year university students is based on a simple mechanical model of fluids, at the *mesoscopic* level, using sponge balls as elements. The aim is to make concrete and visual the typical decomposition of the mechanics of fluids, using objects through which a behavioural analogy can be established. Attention is drawn to local interactions and a transmission of changes, to help students overcome the difficulty of conciliating certain formal laws and the local behaviour of fluids. The sequence is evaluated by means of paper-and-pencil questionnaires as pre-tests and post-tests, whose results are compared against those of "classically" taught control groups, and by studying the transcripts of the student debates that were held in the final session. The observations of a group of trainee-teachers are given, regarding the implementation of the sequence in class.

Some directions for developing the research are suggested at the end of the thesis.

Résumé

Cette thèse comporte: une étude des raisonnements des apprenants sur les fluides ; l'élaboration, l'expérimentation et l'évaluation d'une séquence d'enseignement sur la statique des liquides en présence de gravité, les aspects cinétiques et thermiques étant exclus. Elle présente une analyse des recherches d'autres auteurs sur ces sujets et quelques idées guides sur les raisonnements impliqués dans ce contexte. L'analyse du contenu et l'étude des conceptions sont envisagés de façon étroitement liée.

Après deux entretiens exploratoires, la recherche sur les raisonnements est faite au moyen de plusieurs questionnaires, aux niveaux du lycée et de la première année universitaire. Un point critique est la difficulté à connecter les actions locales et les effets globaux, ce qui demande un raisonnement systémique, capable de rendre compte du *mécanisme* qui permet d'établir la situation finale d'équilibre.

La courte séquence d'enseignement, expérimentée chez des étudiants de première année universitaire, est basée sur la proposition d'un modèle mécanique simple de liquide, au niveau *mésoscopique*, dont les éléments sont des balles de mousse. Le but est de rendre concrète et visuelle la décomposition typique en mécanique des fluides, en évoquant des objets avec lesquels établir une analogie de comportement. L'attention est posée sur les interactions locales et sur la transmission des changements, pour aider les étudiants à surmonter leur difficulté à concilier les lois formelles et le comportement local du fluide. L'évaluation de la séquence se fonde sur: des pre-tests et des post-tests, sous forme de questionnaires papier-crayon, comparés avec les résultats de groupes témoins ayant suivi un cours "classique" ; des enregistrements audio des débats entre étudiants lors de la séance finale. Les réactions d'un groupe d'enseignants en formation sont reportées, concernant une éventuelle reprise de la séquence.

Quelques lignes de développement ultérieur de la recherche sont données.

Abstract

This thesis presents: a study of the forms of reasoning learners apply when dealing with fluids; the design, experimentation and evaluation of a teaching sequence on the statics of fluids in the presence of gravity, kinetic and thermic aspects excluded. It contains an analysis of previous research on this topic by other authors; and some guiding ideas on the reasoning involved in this context. Content analysis and the study of conceptions are linked throughout.

Besides two preliminary interviews, the research on reasoning involves several questionnaires put to high-school and first-year university students. One crucial point is a difficulty in connecting local actions and global effects; this requires a systemic form of reasoning, to explain the *mechanism* establishing the final situation of equilibrium.

The short teaching sequence experimented among first-year university students is based on a simple mechanical model of fluids, at the *mesoscopic* level, using sponge balls as elements. The aim is to make concrete and visual the typical decomposition of the mechanics of fluids, using objects through which a behavioural analogy can be established. Attention is drawn to local interactions and a transmission of changes, to help students overcome the difficulty of conciliating certain formal laws and the local behaviour of fluids. The sequence is evaluated by means of paper-and-pencil questionnaires as pre-tests and post-tests, whose results are compared against those of "classically" taught control groups, and by studying the transcripts of the student debates that were held in the final session. The observations of a group of trainee-teachers are given, regarding the implementation of the sequence in class.

Some directions for developing the research are suggested at the end of the thesis.